



EESTI MAAÜLIKOOL  
Metsandus- ja maaehitusinstituut

**Reijo-Tero Roopalu**

**STAATILISE LASERSKANEERIMISE ANDMETE PÕHJAL  
PUISTANGU MAHTUDE ARVUTAMISE TÄPSUS  
ACCURACY OF STOCKPILE VOLUME CALCULATIONS  
BASED ON STATIC LASER SCANNING DATA**

Magistritöö  
Geodeesia ja maakorralduse õppekava

Juhendaja: dotsent Natalja Liba, *PhD*

Tartu 2018

Eesti Maaülikool		Magistritöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Reijo-Tero Roopalu		Õppekava: Geodeesia ja maakorraldus	
Pealkiri: Staatilise laserskaneerimise andmete põhjal puistangu mahtude arvutamise täpsus			
Lehekülgi: 80	Jooniseid: 37	Tabeleid: 8	Lisasid: 12
Osakond / Õppetool:		Geomaatika õppetool	
ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood:		4. Loodusteadused ja tehnika, Geodeesia (P515)	
Juhendaja(d):		dotsent Natalja Liba	
Kaitsmiskoht ja -aasta:		Tartu 2018	
<p>Magistritöö eesmärgiks on uurida puistangu mahtude määramise täpsust staatilise laserskaneerimise andmete põhjal.</p> <p>Töös võrreldi omavahel GNSS meetodiga mõõdistatud andmete põhjal arvutatud mahtu staatilise laserskaneerimise andmete põhjal arvutatud mahuga. Mõõtmised viidi läbi kahel objektil, Laiküla turbarabas ja Karude karjääris. Uurimistöö GNSS mõõtmisteks kasutati Trimble R4 GNSS seadet koos TSC-3 väliarvutiga ning staatiliseks laserskaneerimiseks kasutati skaneerivat elektrontahhümeetrit Trimble SX10. Andmete töötlemiseks kasutati <i>Trimble Business Centre</i> tarkvara, <i>Autodesk ReCap</i> tarkvara, <i>Autodesk AutoCAD Civil 3D 2019</i> tarkvara ning <i>Microsoft Excel</i> tarkvara.</p> <p>Uurimistöös koostati laserskaneerimise andmete põhjal 3D mudelid 0,05 m, 0,1 m, 0,3 m ja 0,5 m punktitihedusega. Puistangu mahtude arvutamise täpsuse hindamisel võrreldi erinevate 3D mudelite mahte õigeks loetud mahuga, milleks on 0,05 m punktitihedusega 3D mudeli põhjal arvutatud maht. Mahtude keskmine suhteline erinevus kahe objekti põhjal on GNSS andmete põhjal 4,22 %. Järgnevalt erines õigeks loetud tulemusest 0,3 m punktitihedusega mudeli arvutatud maht 0,67 %, 0,5 m punktitihedusega mudeli maht erines 0,36 % ja 0,1 m punktitihedusega mudeli maht erines 0,04 %. Kogu skaneerimise andmete põhjal arvutatud mahtude keskmine suhteline erinevus on 0,36 %. Arvutatud tulemused jäid lubatud 12 % suhtelise erinevuse piiridesse.</p> <p>Uurimistöö tulemuste põhjal järeldati, et staatiline laserskaneerimine on mahtude arvutamiseks vajalikul mõõdistamisel töö kiiruselt traditsioonilistele GNSS ja tahhümeetrilisele mõõdistamisele sobivaks alternatiiviks.</p>			
Märksõnad: staatiline laserskaneerimine, mahuarvutused, täpsus, GNSS mõõtmine			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Masters's Thesis	
Author: Reijo-Tero Roopalu		Specialty: Land Surveying and Land Management	
Title: Accuracy of stockpile volume calculations based on static laser scanning data			
Pages: 80	Figures: 37	Tables: 8	Appendixes: 12
Department / Chair:		Chair of Geomatics	
Field of research and (CERC S) code:		4. Natural Sciences and Engineering,	
Geodesy (P515)			
Supervisors:		associate professor Natalja Liba	
Place and date:		Tartu 2018	
<p>Masters's thesis aim is to research the accuracy of stockpile volume calculations based on static laser scanning data.</p> <p>Thesis compared the volume calculated on the basis of data measured by the GNSS method and on the basis of static lasers scanning data. Measurements were made on two objects, in Laiküla peat bog and Karude quarry. For the GNSS measurements Trimble R4 GNSS device was used with the TSC-3 controller, Trimble SX10 scanning total station was used for static laser scanning. Data was processed using Trimble Business Centre software, Autodesk AutoCAD Civil 3D 2019 software and Microsoft Excel software. 3D models with 0,05 m, 0,1 m, 0,3 m and 0,5 m point density were created based on laser scanning data.</p> <p>Calculating the volumes of objects, the volumes of different 3D models were compared to the correct volume, which is the volume calculated on the basis of a 0,05 m point density model. The average relative difference of volume, based on two objects in GNSS data is 4,22 %. Subsequently, the calculated volume in the 0,3 m point density model was 0,67 % different, 0,5 m point density model was 0,36 % different and the 0,1 m point density model was 0,04 % different. The relative average difference of volumes, based on laser scanning data is 0,36 %. All the researched methods remain within the limits of the relative 12 % permissible difference.</p> <p>Based on the results of this masters's thesis, it was concluded that static laser scanning is an appropriate alternative for measuring volumes to traditional GNSS and tachymetric surveying.</p>			
Keywords: static laser scanning, volume calculation, accuracy, GNSS measurement			

# SISUKORD

SISSEJUHATUS .....	6
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE.....	8
1.1 Puistangu mahtude arvutamine .....	8
1.1.1 Puistangu mahtude arvutamine digitaalses 3D-mudelis TIN meetodil.....	9
1.2 Puistangu mahtude määramise erinevad viisid .....	13
1.2.1 Terrestriline laserskaneerimine .....	16
1.3 Mahtude arvutamise täpsus.....	25
1.4 Uurimistööde ülevaade staatilise laserskaneerimise andmete põhjal tehtud puistangute mahuarvutustes .....	26
2. MATERJAL JA METOODIKA.....	32
2.1 Uurimistöö objekt ja kasutatud vahendid .....	32
2.2 Uurimistöös kasutatud andmed ja meetoodika .....	34
2.2.1 Uurimistöö läbiviimine Laiküla turbaraba objektil.....	35
2.2.2 Uurimistöö läbiviimine Karude karjääri objektil .....	40
2.2.3 Andmete töötlemine .....	42
3. TÖÖ TULEMUSED NING ARUTELU .....	51
3.1 Objektide mahtude arvutamise tulemused .....	51
3.2 Mahtude arvutamise täpsuse ja töö kiiruse hindamine .....	53
3.3 Arutelu .....	58
KOKKUVÕTE .....	61
KASUTATUD KIRJANDUS .....	63
ACCURACY OF STOCKPILE VOLUME CALCULATIONS BASED ON STATIC LASER SCANNING DATA.....	65
LISAD .....	67
Lisa 1. Laiküla turbaraba objekti 3D mudel pealtvaates 0,05 m punktitiheusega .....	68
Lisa 2. Laiküla turbaraba objekti 3D mudel pealtvaates 0,1 m punktitiheusega .....	69
Lisa 3. Laiküla turbaraba objekti 3D mudel pealtvaates 0,3 m punktitiheusega .....	70
Lisa 4. Laiküla turbaraba objekti 3D mudel pealtvaates 0,5 m punktitiheusega .....	71
Lisa 5. Karude karjääri objekti punktipilve A põhjal loodud 3D mudel pealtvaates 0,05 m punktivahega.....	72
Lisa 6. Karude karjääri objekti punktipilve A põhjal loodud 3D mudel pealtvaates 0,1 m punktivahega.....	73
Lisa 7. Karude karjääri objekti punktipilve A põhjal loodud 3D mudel pealtvaates 0,3 m punktivahega.....	74

Lisa 8. Karude karjääri objekti punktipilve A põhjal loodud 3D mudel pealtvaates 0,5 m punktivahega .....	75
Lisa 9. Karude karjääri objekti punktipilve B põhjal loodud 3D mudel pealtvaates 0,05 m punktivahega.....	76
Lisa 10. Karude karjääri objekti punktipilve B põhjal loodud 3D mudel pealtvaates 0,1 m punktivahega.....	77
Lisa 11. Karude karjääri objekti punktipilve B põhjal loodud 3D mudel pealtvaates 0,3 m punktivahega.....	78
Lisa 12. Karude karjääri objekti punktipilve B põhjal loodud 3D mudel pealtvaates 0,5 m punktivahega.....	79

## SISSEJUHATUS

Laserskaneerimine on Eestis ja mujal maailmas väga aktuaalne, kuna see on kiirelt arenev valdkond, millele leitakse üha rohkem rakendusi. Tänapäeval on suure arengu teinud läbi ka skaneerivad elektrontahhümeetrid, mis on muutunud kiiremaks ja on hakanud klassikalisele terestrilisele laserskannerile konkurentsi pakkuma oma universaalsuse poolest.

Puistangu mahtude arvutamiseks vajalikul mõõtmisel on laserskaneerimisel võrreldes tavapärase GNSS ja tahhümeetrilise mõõtmisega suurema mõõdetavate punktide arvu ning mõõdistamiskiiruse tõttu eelis. Ebakorrapärase objekti mõõdistamisel saab laserskaneerimise andmete põhjal teha täpsema 3D-mudeli ning mõõdetud objekti ruumala täpsemalt välja arvutada.

Tänapäeva ehitusprotsess on arenenud järjest efektiivsemaks, samas ka kallimaks, mida põhjustab muuhulgas ehitusmaterjalide hindade tõus. Ehitustegevuse käigus on seetõttu vaja kontrollida ja pidada arvestust täitematerjalide mahu kohta, et hoida kokku raha ja vältida mahtudega manipuleerimist. Täitematerjalide all on mõeldud kruusa, liiva, killustikku ja freesmaterjali. Lisaks tegeletakse Eesti turbarabades ka aktiivse turba tootmise ja müügiga ning mahtude üle arve pidamine on ka seal aktuaalne. Eespool loetletud materjalid on ladustamisel üldiselt kuhjatud kuhilatesse ning seetõttu on nende täpset mahtu suhteliselt raske mõõta ja hinnata.

Traditsioonilise geodeetilise mõõdistusega saab koostada mõõdetud punktide järgi 3D-mudel aga mudeli täpsus sõltub mõõdetud punktide arvust ja võimalikult täpsest uuritava objekti reljeefi kujutamisest. Võib juhtuda, et välitööl on mõõdetud objektile liiga vähe punkte ja 3D-mudel ei tule piisavalt detailne. Antud probleemi lahendamiseks tuleks objekt tihedamalt üle mõõta, mis tähendab lisa aja- ning tööjõukulu. Laserskaneerimise abil saab uuritavast objektist tiheda punkt pilve ja üldiselt ei ole objekti teistkordset mõõdistamist andmete juurdesaamiseks vaja.

Antud magistritöö eesmärgiks on uurida puistangu mahtude määramise täpsust staatilise laserskaneerimise andmete põhjal. Uurimistöös püstitati kaks hüpoteesi. Esimeseks

hüpoteesiks on staatilise laserskaneerimise suurem täpsus puistangu mahtude arvutamisel võrreldes GNSS meetodiga. Teiseks hüpoteesiks on, et traditsiooniline GNSS ja tahhümeetrilise mõõdistamine on mahtude mõõdistamiseks liiga aeganõudev. Staatiline laserskaneerimine võiks olla nendele meetoditele alternatiiviks.

Töös võrreldakse kahe objekti mahtu staatilise laserskaneerimise ja GNSS mõõdistamise andmete põhjal. Laserskaneerimiseks kasutatakse Trimble SX10 skaneerivat elektrontahhümeetrit ja GNSS mõõtmiste jaoks Trimble R4-3 RTK seadet. Mõlema meetodi mõõdistusandmete põhjal koostatakse 3D-mudelid ja hinnatakse tööks kulunud aega ja mudelite täpsust. Laserskaneerimisel skaneeriti uuritavat objekti kaks korda, et veenduda saadud tulemuste õigsuses. RTK mõõtmised viidi läbi üks kord.

Töö esimeses osas antakse kirjanduse ülevaade mahtude mõõdistamise ja arvutamise erinevatest viisidest ning ülevaade skaneerimise tehnoloogiast ja analüüs tehtud töödest antud valdkonnas. Töö teises osas antakse ülevaade kasutatud materjalidest ja metoodikast ning töö kolmandas osas antakse ülevaade töö tulemustest ja arutelust.

Autor avaldab tänu Natalja Libale lõputöö juhendamise eest. Autor tänab lisaks Raxoest OÜ-d ja Mart Raed skaneeriva tahhümeetri kasutamise võimaldamise eest objektide laserskaneerimisel ning Eesti Maaülikooli üliõpilast Kaupo Kokamäge, kes abistas andmete kogumisel.

# 1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

## 1.1 Puistangu mahtude arvutamine

Puistangu mahtude, edasipidi mahtude arvutamiseks võib kasutada mitmeid meetodeid. Igal meetodil on eelised ja puudused, sõltuvalt objekti kujust (Pflipsen 2006: 9). Objekti kujud võime üldiselt jagada kaheks, pindmisteks objektideks ja lineaarseteks objektideks. Tänavad, raudteed ja tunnelid on lineaarsed objektid. Pindmised objektid on prügimäed, karjäärid, täitematerjali kuhilad ja muud ebakorrapäraseks objektid. Lineaarsete objektide mahtude arvutamise puhul kasutatakse tavaliselt ristlõike meetodit (Pflipsen 2006: 9). Pinnaobjektide mahtude arvutamiseks kasutatakse trapetsi meetodit või ristkülikukujulisi ja kolmnurkseid prisma valemeid (Pflipsen 2006: 9).

Karjäärides, kaevandustes, mäetööstustes, süvendamistel ning ehitusprojektides on vaja teada kaevamise või täitmise mahtu (Hamzah, Said 2011: 15). Mahu arvutamine objektide kohta, mille pinnale on vaja mõõta palju mõõtepunkte, on raskem ja nõuab keerulisemate valemite kasutamist. Need võivad põhjustada vigu mõõdetud mahu ja objekti tegeliku mahu vahel, mis mõjutab tööde täpsust (Hamzah, Said 2011: 16).

Põhiline küsimus enne mahtude mõõtmist on see, et milline meetod tuleks valida antud probleemi lahendamiseks, ehk milline on parim meetod mahtude arvutamiseks. Ei ole paigas täpseid reegleid, milline meetod on parim. W. Böhleri arvates peab optimaalseima meetodi valima iga objekti puhul individuaalselt ja seda ei saa panna paika üldiste reeglitega (Pflipsen 2006: 4). Mõõtmismeetodi valimisel tuleks arvesse võtta järgmiseid tegureid: mõõdetava ala või objekti suurus, olemasolev varustus, nõutud täpsus, olemasolevad referentsvõrgud ja majanduslikud kaalutlused (Pflipsen 2006: 4).

Tehnoloogia arenguga geodeesias on nõudlus täpsuse järele mullatööde mahtude arvutamisel muutunud väga oluliseks. Tavapärast mõõdistamismeetodit kasutades on geodeedil täitematerjali mahtu täpselt arvutada suhteliselt keeruline. Koonusekujulised täitematerjali kuhilad võivad geodeedile isegi olla mõõtmiseks liiga ohtlikud. Põhilised ohud on suure kaldega kuhilad või materjali juurde kuhjamine ja alt otsast ära vedamine



(Hamzah, Said 2011: 16). Laserskaneerimise tehnoloogia võimaldab punkte mõõta distantstilt ning geodeet ei pea mahu mõõtmiseks uuritava objekti peale minema, sellega kaob ära oht mõõdetavalt objektilt alla libiseda või varingu alla jääda.

### **1.1.1 Puistangu mahtude arvutamine digitaalses 3D-mudelil TIN meetodil**

Mudel on objekti või nähtuse koopia, mida on reaalsuses vähendatud ja vastavalt vajadusele ümber kujundatud (Li jt 2005: 4). Mudelil võivad olla konkreetsed eesmärgid nagu prognoosimine ning kontroll, sellel puhul peab mudelil olema piisavalt detaile, et vastata püstitatud eesmärkidele (Li jt 2005: 5).

Digitaalsed kõrgusmodelid on geograafilise analüüsi lahutamatud osad, mida on vaja pindade kirjeldamiseks ning piltide täpsustamiseks. Digitaalne kõrgusmodel on maastiku või maapinna kõrguse andmete põhjal loodud pinnamodel või kolmedimensiooniline esitus pinnast (Geoimage 2018). Digitaalne kõrgusmodel koosneb suurest hulgast punktidest millel on X, Y, Z koordinaadid mingis suvalises süsteemis. Võrreldes traditsioonilise mudeliga on digitaalsel kõrgusmodelil järgnevad omadused:

- mitmesugused esitusvormid. Digitaalsel kujul saab kergesti koostada erinevaid esitusviise, näiteks topograafilisi kaarte, vertikaalseid- ja horisontaalseid ristlõikeid ja 3D animatsioone;
- aja jooksul andmete täpsuse kadu puudub. Paberkaardid võivad aja jooksul deformeeruda, aga digitaalne kõrgusmodel säilitab selle algupärase täpsuse;
- reaalajas andmete töötlemine ja automatiseerimine. Digitaalsel kujul mudeli uuendamine ja andmete lisamine on lihtsam kui füüsilistel mudelitel;
- lihtsam mitmel resolutsioonil esitlemine. Digitaalset kõrgusmodelit saab esitleda erineva resolutsiooniga ning mõõtkavaga (Li jt 2005: 7).

Erineva valdkonna inimesed on huvitatud erinevatest maastiku omadustest nagu kalletest, pindalast, mahust ja hüdrooloogilistest parameetritest (Li jt 2005: 267). Modelleerimiseks kasutatakse tavaliselt järgmiseid viise:

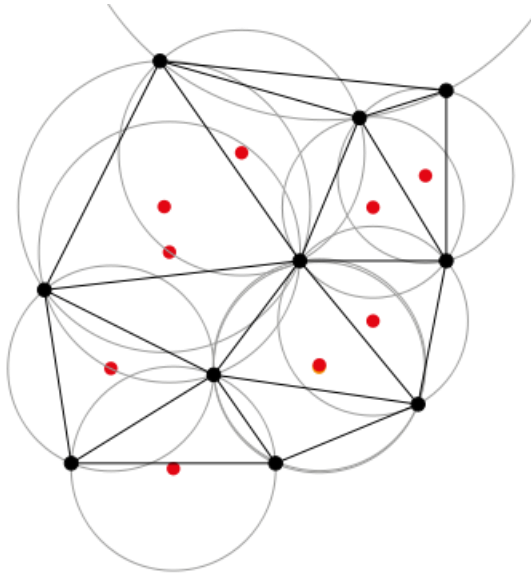
- punktipõhine modelleerimine;
- kolmnurkade põhine modelleerimine;

- võrgupõhine modelleerimine;
- hübriidne modelleerimine, sisaldab eespool nimetatud kolme elementi (Li jt 2005: 267).

Antud uurimistöös kasutatakse ebaregulaarsete kolmnurkade võrgustikupõhist ehk TIN meetodil pinna modelleerimist ning seetõttu autor teistel modelleerimise meetoditel pikemalt ei peatu. Kolmnurka võib pidada üheks põhiliseks geomeetriliseks kujundiks, kuna ruudu ja ristküliku või mistahes kujuga polügooni saab jagada kolmnurkadeks (Li jt 2005: 69). Lisaks on kolmnurgad oma kuju ja suuruse poolest paindlikud ning neid saab lihtsalt kasutada murdejoonte ja muude keeruliste kujundite tegemisel. Seetõttu on kolmnurkadel põhinev modelleerimine üks peamisi viise kõrgusmodelite koostamisel (Li jt 2005: 70). TIN võrgu moodustamine ebakorrapäraselt jaotatud andmetest ehk mõõdetud punktidest ei ole nii lihtne kui korrapäraselt jaotatud andmetest, kuigi selle jaoks on olemas palju algoritme. Üldiselt on TIN võrgu moodustamiseks kolm põhinõuet:

- unikaalsete andmete puhul peaks TIN võrgustik sama algoritmi kasutades tulema samasugune, isegi kui TIN võrgu loomist alustati erinevatest kohtadest;
- saadud kolmnurkade kujud peavad olema optimaalsed, peaaegu võrdkülgsed;
- iga kolmnurk peab olema moodustatud lähimate punktidega ehk kolmnurga külgede summa peab olema minimaalne (Li jt 2005: 79).

Kõigist võimalikest alternatiividest on kõige levinum Delaunay triangulatsioon, sest see vastab kõigile kolmele eelnimetatud nõudele. Delaunay triangulatsioon on seotud, kuid mitte kattuvate kolmnurkade võrgustik (Li jt 2005: 79). Iga kolmnurga tippude läbi tõmmatud ring ei tohi sisaldada teisi punkte, see on üks Delaunay triangulatsiooni kasutamise tingimustest. Delaunay triangulatsioon on Voronoi diagrammi kaksik diagramm ja seda saab tuletada Voronoi diagrammist. Delaunay triangulatsioon toimub kolme naaberpunkti ühendamise teel vastavates Voronoi piirkondades, millel on ühine tipp ja see ühine tipp on Delaunay triangulatsiooni ümbritseva ringi keskpunkt (joonis 1) (Li jt 2005: 79).



**Joonis 1.** Delaunay triangulatsioon ümbritsevate ringide ja punaste ringi keskpunktidega (Wikipedia 2018).

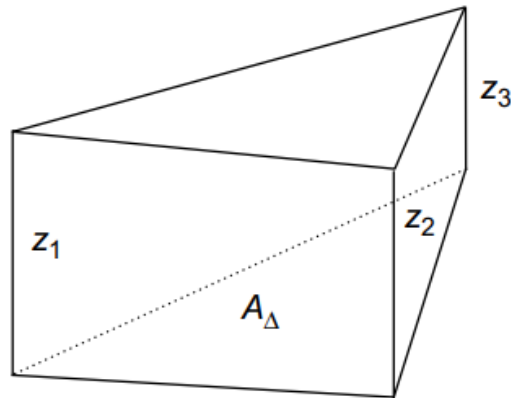
TIN võrgustikus moodustamiseks on andmepunktide kasutamisel kaks valikut. Esimene variant on kasutada kõiki andmeid võrgu moodustamiseks, seda nimetatakse staatiliseks lähenemiseks ning seda kasutatakse Delaunay triangulatsiooni puhul. Alternatiivne meetod on punktide lisamine või eemaldamine triangulatsiooni käigus. Punktide eemaldamist triangulatsioonis nimetatakse dünaamiliseks protsessiks ja seda saab teha ilma kogu võrgustikku iga kord rekonstrueerimata (Li jt 2005: 87).

Digitaalse kõrgusmudeli andmete kvaliteeti mõõdetakse tavaliselt asukoha ja kõrguse täpsuse kontrolliga. Üldiselt võib digitaalse kõrgusmudeli lähteandmetes eristada kolme tüüpi vigu:

- juhuslikud vead;
- süstemaatilised vead;
- jämedad vead (Li jt 2005: 134).

Juhuslike vigade mõju saab vähendada kasutades filtreerimist. Süstemaatiliste vigade puhul on kogenud mõõdistajad neist teadlikud ja püüavad neid minimeerida. Jämedad vead tekivad näiteks vale suuna salvestamisel või kui instrument ei tööta korralikult (Li jt 2005: 134).

Kõrgusmodeli geomeetrilisi parameetreid saab kasutada pindala, projektsioonipiirkonna ja mahu arvutamiseks (Li jt 2005: 267). Mahu arvutamine digitaalsest kõrgusmodelist TIN meetodil on näidatud joonisel 1.



**Joonis 2.** Mahu arvutamine mudelist TIN meetodil (Li jt 2005: 270).

Peale horisontaaltasapinna A pindala arvutamist arvutatakse maht kolmnurksele prismale kasutades valemit 1:

$$V_3 = \frac{z_1 + z_2 + z_3}{3} * A_{\Delta} \quad (1)$$

Kus  $V_3$  on kolmnurkse prisma ruumala,

$z_1$ ,  $z_2$  ja  $z_3$  on prisma kõrgused,

3 on kõrguste arv,

$A_{\Delta}$  on prisma põhja pindala (Li jt 2005: 270).

Kuna valitud meetodil koosneb kogu mudel kolmnurkadest, saab antud meetodiga teada 3D mudeli kogu mahu.

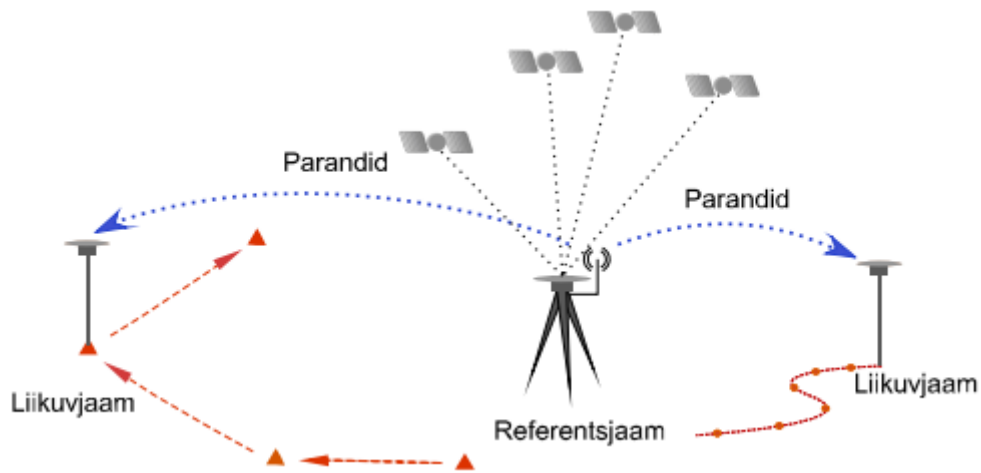
## 1.2 Puistangu mahtude määramise erinevad viisid

Puistangu mahtude määramiseks kasutatakse erinevaid viise. Geodeetidel on mitmekesine valik kasutada erinevaid aparate punktide täpseteks mõõtmisteks. Sõltuvalt uuritava ala suurusest ja ulatusest tuleks valida vastav tehnoloogia ja meetodika. Kõige enam kasutatakse GNSS meetodit ja elektrontahhümeetrist meetodit, harvemini kasutatakse staatilist laserskaneerimise meetodit ja fotogramm-meetrist meetodit.

**GNSS mõõdistamisel** mõõdetakse uuritava objekti reljeef. Erinevalt elektrontahhümeetrist ei ole GNSS seadet vaja orienteerida. GNSS süsteem tähendab globaalset navigeerimise süsteemi, mis on seotud kosmosest signaale saatvate satelliitidega ja maapeal oleva GNSS vastuvõtjaga. GNSS süsteemil on ülemaailmne kattuvus. GNSS süsteemi kuuluvad Euroopa Galileo, USA NAVSTARi globaalsest positsioneerimissüsteemist (GPS), Venemaa satelliitnavigatsiooni süsteemist GLONASS ja Hiina satelliitnavigatsioonisüsteemist BeiDou (What is GNSS 2018).

GNSS vastuvõtjaga liigutakse mõõdistamise ajal ühelt punktilt teisele ja mõõdetakse igas punktis kolmemõõtmelised koordinaadid (Männamets 2015: 13). Mida lagedam ja siledam on ala, seda hõredamalt objekt mõõdistatakse. Nõlvad mõõdetakse tihedamalt koos nõlva aluste ja nõlva pealsetega, lisaks mõõdetakse mudeli täpsema kuju saamiseks reljeefi murdepunktid (Kolõganova 2014: 45).

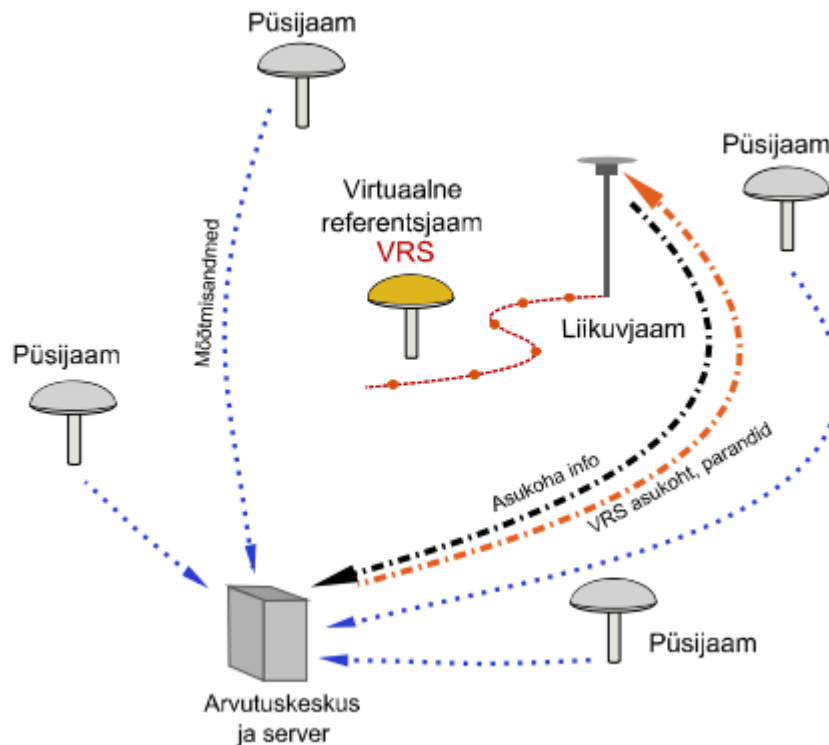
Geodeetilistel mõõtmistel kasutatakse üldiselt RTK (*Real Time Kinematic*) positsioneerimise süsteemi, kus liikuvjaama vastuvõtjaga liigutakse ühel mõõdetavalt punktilt teisele ning teine baasjaama vastuvõtja asub kindelpunktil (Kirs 2017: 6). Liikuvjaamale ja baasjaamale on vajalik omavaheline reaalaajas andmeside, et baasjaam saaks edastada liikuvjaamale parandeid (joonis 3).



**Joonis 3.** RTK mõõtmises põhimõtteline skeem (Rüdja, Sander 2013: 245).

RTK plaanilise asendi täpsus on  $1 \text{ cm} + 2 \text{ ppm}$  ja vertikaalsuunaline täpsus  $2 \text{ cm} + 2 \text{ ppm}$ , mis eeldab kahesagedusliku vastuvõtja kasutamist (Rüdja, Sander 2013: 244). Antud täpsuse saavutamiseks on tarvis enne mõõtmistega alustamist lahendada algundmatu, ehk täisarv kandevlaine pikkusi (Rüdja, Sander 2013: 245).

RTK mõõtmised, mis kasutavad parandite saamiseks püsijaamade võrku on oma olemuselt sarnased baasjaama kasutava RTK mõõdistamisega. Erinevus on selles, et parandid saadakse olemasolevast püsijaamade võrgust ja kasutajate arv ei ole piiratud (Rüdja, Sander 2013: 249). VRS (*Virtual Reference Station*) meetodil püsijaama võrgu puhul genereeritakse liikuvjaama esialgsesse asukohta virtuaalne referentsjaam ja mõõtmised toimuvad virtuaalse referentsjaama suhtes (joonis 4).



**Joonis 4.** VRS meetodi põhimõtteline skeem (Rüdja, Sander 2013: 254).

Antud lõputöös viidi GNSS mõõtmised läbi kasutades Maa-ameti GNSS püsijaamade võrku. GNSS meetodil mõõdetud punktide põhjal koostatakse mahu arvutamiseks 3D mudel.

**Elektrontahhümeetriga mõõdistamisel** mahtude arvutamiseks tuleks enne mõõtmist mõõdetavad punktid tavaliselt välja valida. Oluline on välja valida mida mõõdetakse ning õige punktide hulk. Liiga väheste punktide ning reljeefi mõõtmine annab madala täpsuse. Liiga paljude punktide mõõtmine vähendab aga efektiivsust ja suurendab andmete hulka, mis tähendab mahukamat andmete töötlust (Pflipsen 2006: 36). Mõõdetud punktide põhjal koostatakse mahtu arvutamiseks 3D mudel. G. Müller on öelnud, et maastiku modelleerimise kunst koosneb võimalikult täpse mudeli mõõtmisest minimaalsete andmetega (Pflipsen 2006: 36). Tahhümeetriga saab mõõta nii prismaga kui ka ilma prismata, kasutades lasermõõtmist (Jürgenson 2011: 29). Uuritava objekti reljeefi saab sellest lähtuvalt mõõta kahe erineva meetodiga. Millist meetodit valida ning kas kasutada prismat või laserit, otsustab mõõtja vastavalt mõõdetava objekti iseloomule ja varasemale kogemusele.

**Mehitamata õhusõidukite** (UAV) fotogramm-meetria kasutamine mahtude määramisel. UAV süsteemid on andmete kogumise platvormina muutunud järjest atraktiivsemaks paljudele mõõdistamisega tegelevatele ettevõtetele. UAV süsteemide abil saab kiirelt kaardistada suuri alasid ning kasutades fotogramm-meetriat saab UAV andmete põhjal luua 3D mudeleid (Siebert, Teizer 2014: 1).

UAV abil mõõdistamiseks kasutatakse kaamerat, millega tehakse uuritavast objektist aerofotod. Fotogramm-meetrilistel eesmärkidel kasutamiseks peaks aerofotode omavaheline piki- ja põikikattumine olema vähemalt 70 % (Berg-Jürgens 2015: 19). Uuritava objekti asend, mõõtmed ja kuju määratakse fotode järgi (Männamets 2015: 15).

UAV-de kasutamine fotogramm-meetriliste andmete kogumisel ja mahtude arvutamiseks vajalike andmete pildistamisel on väga head eeldused, kuna aerofotod saab teha suhteliselt hea kvaliteediga ja UAV ise on väga kuluefektiivne (Siebert, Teizer 2014: 8).

Otsene aerofotode georefereerimine on võimalik, kui UAV pardal oleva GPS seadme andmed on sünkroniseeritud UAV pardal oleva kaameraga. Nii on võimalik fotod eksportida kaamerast otse WGS84 koordinaatide süsteemis (Siebert, Teizer 2014: 6).

Antud uurimistöös kasutab autor mahtude arvutamiseks staatilise laserskaneerimise meetodit, seetõttu keskendutakse antud meetodi kirjeldamisele põhjalikumalt.

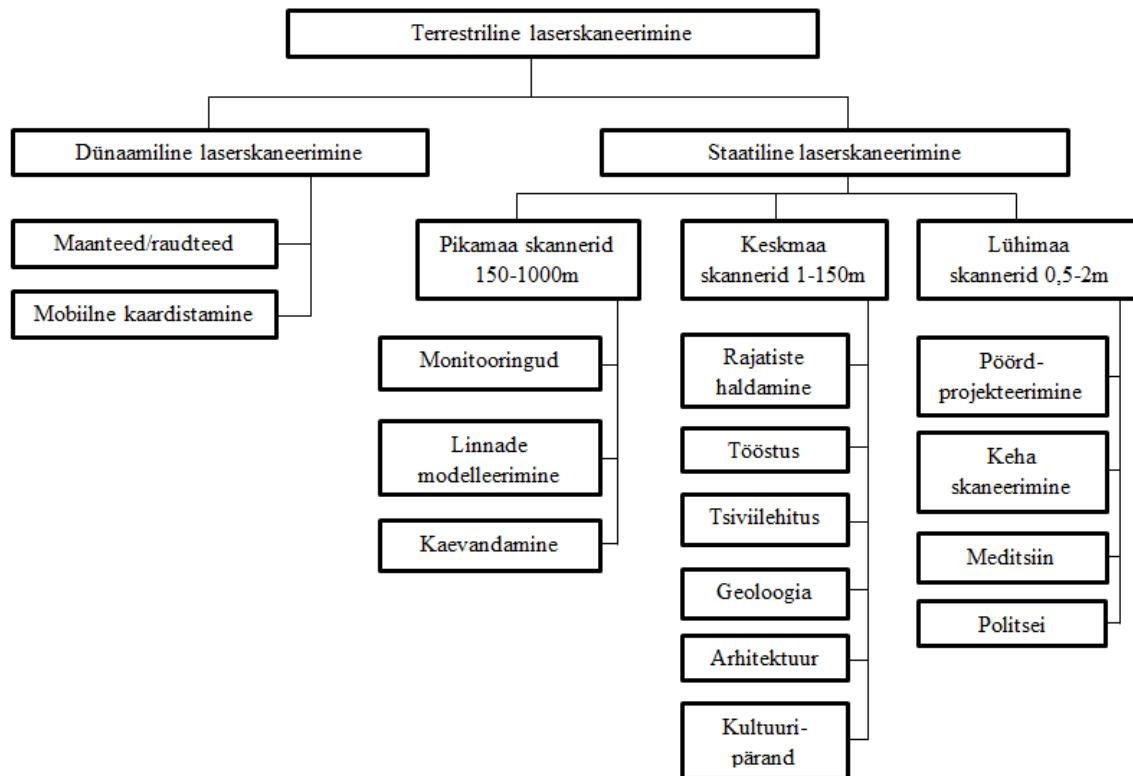
### **1.2.1 Terrestriline laserskaneerimine**

Nii nagu igas uurimisvaldkonnas on ka geodeetilistes uurimistöödes tehnoloogilised uuendused, mis viivad järjest kiiremate, mitmekülgsemate ja täpsemate seadmete kasutuselevõtmiseni (Lachat jt 2017: 1). Võrreldes elektrontahhümeetrilise mõõdistamise või GNSS mõõdistamisega võimaldab terrestriline laserskaneerimine mõõdistada uuritavast objektist tiheda punktipilve ja kujutada mõõdetud objekti kolmemõõtmeliselt (Lachat jt 2017: 1).

Kaasaaegse laserskaneerimise tehnoloogia võib jagada kahte kategooriasse, staatiliseks ehk paigalseisvaks ja dünaamiliseks ehk liikuvaks (Quintero jt 2008: 12). Staatilisel laserskaneerimise on laserskanner kindlas asendis paigal. Antud meetodi eelis on kõrge



täpsus ja suhteliselt kõrge skaneeritud punktide tihedus (Quintero jt 2008: 12). Dünaamilise laserskaneerimise puhul on skanner paigaldatud liikuvale platvormile, näiteks auto või lennuki peale. Dünaamiline laserskaneerimine vajab mõõdistamisel laserskannerile lisaks ka GPS positsioneerimise süsteemi (Quintero jt 2008: 12). Terrestrilise laserskaneerimise kasutusvaldkonnad on ära näidatud joonisel 5.



**Joonis 5.** Laserskanneri rakendused (Quintero jt 2008: 13).

Laserskanneri tööpõhimõte on sarnane nagu elektrontahhümeetril, mõõdetakse kaugusi ja nurki, mille abil arvutatakse välja mõõdetud punktide koordinaadid (Pflipsen 2006: 22). Laser kiirgab välja elektromagnetkiirgust mis on pidev ja kindla sagedusega, kiirgus levib sadade meetrite kaugusele ning peegeldub objektidelt tagasi. Need on väga kasulikud omadused ning seetõttu kasutatakse antud tehnoloogiat paljudes kaugusmõõteseadmetes (Colombo, Marana 2010: 1).

Skaneeritava objekti ning laserskanneri omavahelise kauguse määramiseks kasutatakse laserkiirt. Laserkiire abil kaugust mõõtvad skannerid saab jagada kaheks: aktiivseks ja passiivseks (Quintero jt 2008: 17). Passiivsed skannerid ei kiirga ise välja kiirgust vaid tuvastavad objektilt peegelduvat kiirgust. Enamik seda tüüpi kiirgust tuvastab nähtavat

valgust, kuna see on kergesti välja eraldatav ümbritsevast kiirgusest. Lisaks saab kasutada ka infrapuna kiirgust. Passiivse skaneerimise meetodi täpsus sõltub põhiliselt pildistamise resolutsioonist ja tuvastatavate tunnuste tihedusest pildil (Quintero jt 2008: 17).

Aktiivsetest laserskanneritest on levinud ajamõõtmisel põhinevad skannerid. Need kasutavad kauguste määramiseks laserimpulsi tagasipeegeldumise aja mõõtmist ja faasinihke mõõtmist (Quintero jt 2008: 21).

**Laserimpulss skanner** saadab välja laserkiire impulsi, mis kestab paar nanosekundit. Seejärel mõõdetakse ära aeg, mis kulub laserkiirel objektini ja tagasipeegeldumiseks instrumendini. Mõõdetud aja põhjal saab välja arvutada distant si laserskanneri ja objekti vahel (Quintero jt 2008: 22). Antud distant si saab arvutada kasutades järgnevat valemit:

$$D = \frac{(c \cdot t)}{2}, \quad (2)$$

kus D on laserskanneri ja objektivaheline distant s (m);

c - valgusekiirus õhus (m/s);

t - signaali saatmise ja vastuvõtmise aeg (s) (Quintero jt 2008: 22).

Valguse levimise kiirus vaakumis  $c = 299,792,458$  m/s ja valguse levimise kiiruse leidmiseks õhus korrigeeritakse seda refraktsiooni indeksiga (Quintero jt 2008: 22). Laserimpulss skannerid ei kasuta pidevat laserkiirt vaid laserimpulsse, mille tõttu skaneeritakse selle meetodi puhul üks punkt korraga. Laserimpulss skannerid suudavad tüüpiliselt mõõta 2000 kuni 50 000 punkti sekundis (Quintero jt 2008: 22).

**Faasinihke skanner** saadab mõõdetavale objektile välja laserkiire ja võrdleb tagasipeegeldunud laserkiire signaali võngete erinevust. Antud meetodi puhul ei ole tarvis suure täpsusega kellasid signaali aja mõõtmiseks (Quintero jt 2008: 24). Faasinihke skannerid kiirgavad pidevalt lasersignaali ja faasinihke mõõtmise abil leitakse distant s skaneeritava objekti ja laserskanneri vahel. Antud distant si leidmiseks kasutatakse järgmist valemit:

$$D = \frac{(n\lambda + d)}{2}, \quad (3)$$

kus D on kaugus laserskanneri ja mõõdetava objekti vahel (m);

n        -täisarv lainepikkuseid valguse edasi ja tagasi kulgemisel;

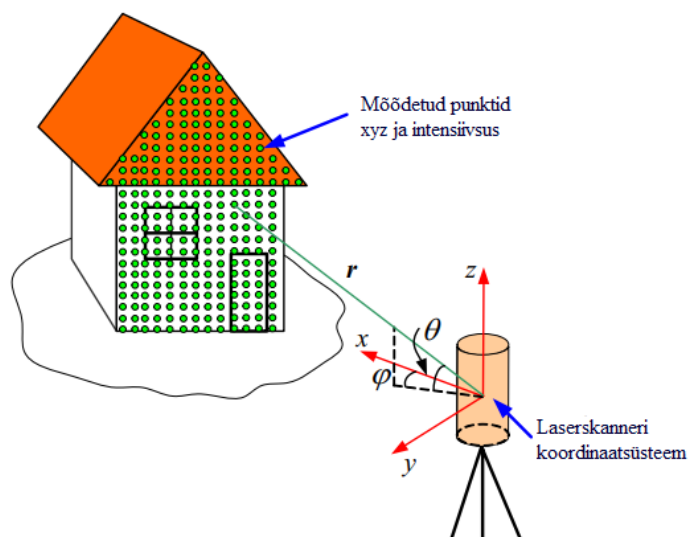
$\lambda$        -lainepikkus;

d        -faasinihke väärtus (Uueküla 2014: 12).

Faasinihke skanneri kasutatakse erineva sagedusega signaale, et saada skaneerides täpsem tulemus, pika lainepikkusega saab määrata skanneri tööulatuse ja lühikese lainepikkusega skanneri täpsuse. Üldiselt on faasinihke mõõtmiselt põhinevad skannerid kiiremad ja parema resolutsiooniga kuid laserimpulss skannerid on täpsemad (Quintero jt 2008: 25). Valdavalt on öeldud, et faasinihke skannerid on laserskaneerimisel tuleviku tehnoloogia. (Alonso jt 2011: 385).

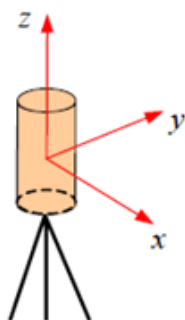
Laserskaneerimise läbiviimisel on üks võtmeküsimustest objekti skaneerimiseks vajaliku resolutsiooni valik. Resolutsioon on kaugus kahe skaneeritud punkti omavaheline kaugus, mis määrab ära skaneeritava punktipilve tiheduse (Quintero jt 2008: 45). Mida kõrgem on resolutsioon, seda mahukam ja detailsem on skaneeritud punktipilv. Siledamatel pindadel piisab vähematest punktidest ja madalamast resolutsioonist ning kõveramatel ja reljeefsematel pindadel tuleks kasutada täpsuse huvides kõrgemat resolutsiooni (Quintero jt 2008: 45).

Laserskanneriiga skaneeritakse huvipakkuvat keskkonda või objekti ning skaneerimise tulemusena saadakse objekti kujust, värvusest ja välimusest andmestik (Quintero jt 2008: 12). Peale objekti skaneerimist saadud andmestikku nimetatakse punktipilveks, mis koosneb tihedalt ja korrapärasel paigutatud punktidest ja mis võib sisaldada kuni mitut miljonit punkti (joonis 6) (Reshetyuk 2009: 18).



**Joonis 6.** Laserskanneri mõõtmismetoodika (Reshetyuk 2009: 18).

Igale skaneeritud punktile arvutatakse X, Y, Z koordinaat (Colombo, Marana 2010: 1). Laserskannerid on objekti vahetult mõõtvad seadmed, mille tõttu on objekti täielikuks mõõdistamiseks tarvis skaneerida mitmest seisupunktist (Quintero jt 2008: 12). Erinevatest seisupunktist skaneeritud punktipilved on seotud skanneri sisemise koordinaatide süsteemiga (joonis 7) (Reshetyuk 2009: 19).



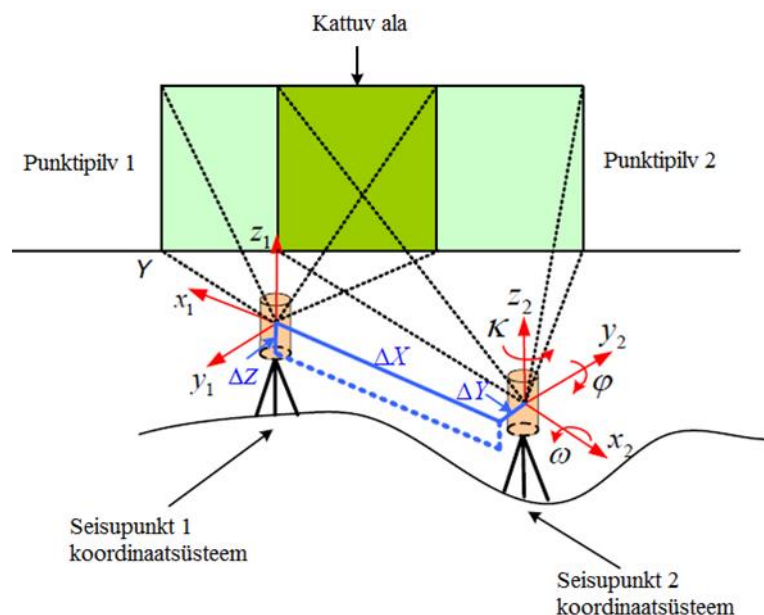
**Joonis 7.** Laserskanneri koordinaatide süsteem (Reshetyuk 2009: 19).

- koordinaatide alguspunkt (koordinaatide nullpunkt) – laserskanneri elektro-optiline keskpunkt;
- Z - telg – kulgeb piki mööda laserskanneri vertikaalset pöörlemistelge;
- X - telg – laserskanneri optilise telje suvaline horisontaalne nurk, näiteks ligikaudne põhjasuund, mis on võetud laserskanneri sisesehitatud kompassi järgi;

- Y - telg – kahe eelneva teljega täisnurga all olev telg, mille abil on moodustatud parempoolne süsteem (Reshetyuk 2009: 19).

Laserskanneerite tootjatel võib skanneri sisene koordinaatide süsteem olla erineva ülesehitusega (Reshetyuk 2009: 19). Ühtse punktipilve jaoks on vaja erinevad skaneeritud punktipilved registreerida ning vajadusel viia koordinaatide süsteemi (Reshetyuk 2009: 19). Kogutud andmete põhjal saab hiljem koostada digitaalseid kahedimensioonilisi jooniseid või kolmedimensioonilisi mudeleid, millel on lai kasutusotstarve (Quintero jt 2008: 12). Laserskaneerimise eeliseks on võime mõõta lühikese aja jooksul suur hulk kõrge täpsusega punkte.

Erinevatest seisupunktidest laserskaneeritud punktipilvede ühtsesse koordinaatide süsteemi viimist nimetatakse registreerimiseks (Reshetyuk 2009: 19). Terrestilise laserskaneerimise andmete integreerimiseks teiste geograafiliste andmetega nagu digitaalsete kaartide või digitaalsete maastikus mudelite tuleb registreeritud punktipilv transformeerida välisesse koordinaatide süsteemi, näiteks kohalikku või riiklikku süsteemi. Antud protseduuri nimetatakse georefereeringuks (Reshetyuk 2009: 19). Kahe skaneeritud punktipilve omavaheliseks registreerimiseks peab neil olema ülekate nagu fotogramm-meetrias kasutatavatel aerofotodel. Tavaliselt kattuvad punktipilved paarikaupa (joonis 8).



**Joonis 8.** Kahe skaneeritud punktipilve omavaheline kattumine (Reshetyuk 2009: 20).

Skaneerimiseks vajalikud seisupunktid tuleks valida optimaalsed, et oleks tagatud maksimaalne ülekate ja täpsus ning seisupunktide arv oleks minimaalne (Quintero jt 2008: 38). Optimaalse laserskaneerimise seisupunkti määramiseks tuleks järgida järgmiseid soovitusi:

- kasutada seisupunkti, millel on suur vaateväli skaneeritavale objektile ja millel ei ole takistusi ning mis tekitavad kõige vähem varjusid;
- kontrollida, kas seisupunkti kasutamisel saavutatakse skaneerimisel vajalik täpsus, mida kaugemal on skaneeritav objekt laserskannerist, seda madalam on täpsus ja resolutsioon;
- minimaliseerida teravate nurkade all tagasipeegelduvate punktide mõõtmist, kuna terava nurga all tagasi peegelduva laserkiire täpsus on madalam;
- vähendada laserskaneerimise seisupunktide arvu;
- järgida tervise ja ohutuse nõudeid;
- võtta arvesse keskkonna mõjusid nagu vibratsioon ja tuul;
- kontrollida kunstlike ja looduslike tähiste nähtavust laserskanneri seisupunktist (Quintero jt 2008: 40).

Autor kasutas uurimistöös skaneerimise seisupunktide valikul eelpool mainitud printsiipe.

Omavahel kattuvad punktipilved on mõlemad enda suvalises koordinaatide süsteemis, samuti võib omavahelise ülekattega punktipilvi olla rohkem kui kaks. Selleks, et transformeerida seisupunkt 2 koordinaatsüsteem seisupunkt 1 koordinaatide süsteemiks tuleb määrata nende omavahelised transformeerimisparameetrid (Reshetyuk 2009: 20). Transformeerimisparameetrite määramiseks ning omavaheliseks registreerimiseks on mitu erinevat meetodit:

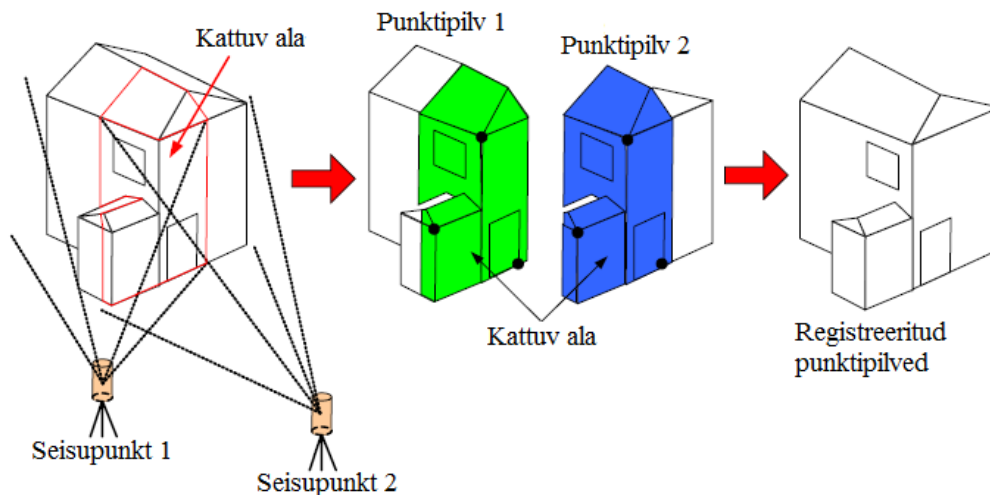
- spetsiaalsete tähiste kasutamine, mis on nähtavad mõlemas punktipilves;
- ühiste looduslike punktide kasutamine;
- pindade omavaheline sobitamine;
- ühiste geomeetriliste objektide kasutamine (Reshetyuk 2009: 20).

Olenevalt objekti iseloomust võib juhtuda, et laserskaneerimisel ei saa tähiseid kasutada, näiteks kõrghoonete skaneerimisel ei ole võimalik igale poole tähiseid paigaldada. Sellisel juhul on võimalik kasutada punktipilvede registreerimiseks looduslike punkte, nagu hoone

nurgad, akende nurgad tähistena. Punktipilvede registreerimine viiakse läbi tähistega registreerimisega sarnaselt, kuid tähiste asemel kasutatakse looduslike punktide tsentreid (Reshetyuk 2009: 22). Antud punktid tuleb punktipilves käsitsi määrata. Looduslike punktide kasutamine punktipilvede registreerimisel on tähistega registreerimisest kehvem kuna:

- ühised punktid kattuvates punktipilvedes ei koosne identsetest punktidest, erinevatest seisupunktidest skaneeritud punktid on laserkiire hajumise tõttu erineva läbimõõduga;
- looduslike punktide tunnuste tuvastamine on pigem subjektiivne, eriti suurte kaldenurkadega laserskaneeringute puhul (Reshetyuk 2009: 22).

Pindade omavahelise sobitamise meetodiga registreerimine puhul kasutatakse kattuvates punktipilvedes olevaid pindmiseid objekte, meetodi põhimõte on välja toodud joonisel 9. Pindade omavahelise sobitamise meetodil punktipilvede omavaheline registreerimine koosneb üldiselt üksteisele lähimate korduvate punktide sobitamise algoritmil (Reshetyuk 2009: 23).



**Joonis 9.** Pindade omavahelise sobitamise meetodiga registreerimine (Reshetyuk 2009: 23).

Pindade omavahelise sobitamise meetodil on oluline skaneeritava objekti 3D geomeetria ülekattega alades. Antud meetodit on hea kasutada tööstushoonete skaneerimisel tehtud punktipilvede registreerimisel, mis sisaldavad palju tehnikat jms ning raskendatud kasutada lamedatel objektidel nagu maanteed ja seinad (Reshetyuk 2009: 23). Soovituslikult peaks pindade omavahelise sobitamise meetodi puhul punktipilvede omavaheline ülekate olema vähemalt 30 % (Reshetyuk 2009: 23).

Ühiste geomeetriliste objektide põhjal punktipilvede registreerimiseks kasutatakse kattuvates punktipilvedes olevaid geomeetrilisi objekte nagu tasapindu ja silindreid, mis on nähtavad mõlemas punktipilves (Reshetyuk 2009: 23). Registreerimise ajal arvutab tarkvara optimaalseima sobivuse punktipilvede vahel, mis põhineb ühiste geomeetriliste objektide omavahelisel parimal sobivusel. Antud meetodi täpsust mõjutab geomeetriliste kujundite ülekate ja laserskaneeritud punktipilvede omavaheline ülekate (Reshetyuk 2009: 24).

Otsese georeferentseerimise puhul orienteeritakse laserskanner koordinaatide süsteemi nagu elektrontahhümeeter (Reshetyuk 2009: 28). Otsese registreerimise puhul arvutatakse laserskanneri asukoht koheselt, mida saab teha kahel viisil. Kasutades laserskannerit, millel on sarnased kasutusvõimalused elektrontahhümeetriga või kasutades laserskannerit, millel on optiline või laser tsentriir, mille abil saab skanneri tsentreerida tuntud punktidele. Orienteerimise lõpetamiseks skaneeritakse üks tähis, mida kasutatakse tagasisivaatena (Quintero jt 2008: 51). Antud meetod vähendab kasutatavate tähiste arvu ning skaneeritud punktipilved ei pea omavahel kattuma. Lisaks on otsene georeferentseerimine sageli kiirem kui suvalisel koordinaatide süsteemis punktipilvede registreerimine (Quintero jt 2008: 52).

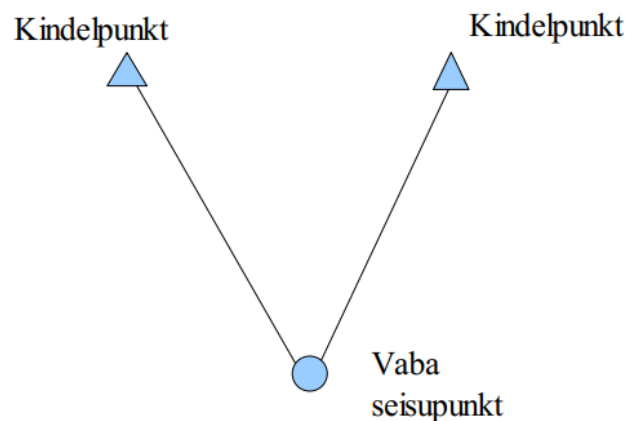
Antud uurimistöös kasutati mahu mõõtmiseks Trimble SX10 skaneerivat elektrontahhümeetrit, millega viidi läbi staatiline laserskaneerimine. Trimble SX10 skaneeriva elektrontahhümeetriga on võimalik kasutada ka lisaks standard mõõtmismeetoditele ka laserskaneerimist. Antud seadet võib vaadelda kui hübriidset lahendust, kus on ühendatud terrestriiline laserskanner ja elektrontahhümeeter. Trimble SX10 skaneerides saab punktipilved otseselt georeferentseerida ning vajadusel ka kaudselt, hilisema andmetöötluse käigus (Lachat jt 2017: 12).

Skaneeriva elektrontahhümeetri orienteerimine on sarnane tavapärase elektrontahhümeetriga, sõltuvalt olemasolevast situatsioonist valitakse orienteerimiseks



tuntud punktil seismise meetod koos tagasivaate suuna mõõtmisega või vabajaama meetodil orienteerimise. Üks eripära Trimble SX10 kasutamisel on see, et seadmel puudub optiline teleskoop ja see on varustatud kaamerate süsteemiga ning kasutaja juhib tahhümeetrit reaalaaja videovoogu kasutades (Lachat jt 2017: 10).

Vabajaamaga orienteerimiseks on vaja minimaalselt kahte kindelpunkti. Nende omavaheline lubatud nurga suurus on 30-150 kraadi (Jürgenson 2011: 48). GPS meetodil maha märgitud kindelpunktidega orienteerimisel arvutatakse vaba seisupunkti koordinaadid joonlõike meetodil (joonis 10). Vaba seisupunkti kasutamisel on väga oluline järgida jääkvigu (Jürgenson 2011: 48).



**Joonis 10.** Vabajaama meetodil eletrontahhümeetri orienteerimine (Jürgenson 2011: 49).

Tahhümeetri vabajaama meetodil orienteerimisel lähtuti eelnevalt kirjeldatud nõuetest.

### 1.3 Mahtude arvutamise täpsus

Mahtude arvutamise täpsus oleneb põhiliselt töö tellija nõudmistest, lisaks on lubatud vead välja toodud Markšeideritöö korra määruses. Markšeideritööd peavad olema kontrollitavad kordusmõõtmiste ja –arvutustega (Riigiteataja 2018). Kahe mõõtesuuruse väärtuse erinevus kordusmõõtmisel ei tohi ületada tabelis 1 toodud suhtarve.

**Tabel 1.** Mõõdistamise täpsus mahtude määramisel (Riigiteataja 2018)

Maht (1000 m <sup>3</sup> )	Kuni 20	20-50	50-200	200-1000	Üle 1000
Kahe erineva määranu lubatud suhteline erinevus väiksema mõõdetulemuse suhtes (%)	12	8	4	3	2

Mahu kahe määranu lubatud erinevuse korral jäetakse lõplikuks mõõdetulemuseks esimene määranu (Riigiteataja 2018). Antud uurimistöös on uuritavate objektide mahud alla 1000 m<sup>3</sup>, lähtudes markseideritöö korra määrusest on kahe erineva määranu lubatud suhteline erinevus väiksema mõõdetulemuse suhtes 12 %.

#### **1.4 Uurimistööde ülevaade staatilise laserskaneerimise andmete põhjal tehtud puistangute mahuarvutustes**

Nagu varem juba mainitud, võib mahtude arvutamiseks kasutada erinevaid viise, kaasaarvatud staatilist laserskaneerimist. Autorile teadaolevalt ei ole Eestis staatilise laserskaneerimise meetodit kasutades mahtude arvutamise kohta uurimistöid tehtud. Selle tõttu annab autor ülevaate tehtud töödest välismaal.

##### **Mahu mõõtmine kasutades skaneerivat elektrontahhümeetrit**

Antud uurimistöö eesmärgiks oli uurida Topcon IS skaneeriva elektrontahhümeetriga puistangu mahtu. Mudeli tegemiseks loodi kolmemõõtmelised pinnad ebaregulaarse kolmnurga meetodiga, mis soodustab aja säästmist ja suurendab mahuarvutuse täpsust. Skaneerimise andmete põhjal arvutatud mahtu võrreldi tahhümeetriga mõõdetud andmete põhjal arvutatud mahuga. Skaneerimisel tehti kaks mudelit 0,3m ja 0,1m punktihedusega. Tulemusi analüüsiti erinevate mahukogustega, erinevate punktide tihedusega ja 3D mudelitega, lisaks analüüsiti andmete saamiseks ja töötlemiseks kulunud aega (Hamzah, Said 2011: 15). Skaneeriv elektrontahhümeetri orienteeriti vabajaama meetodil ja punktipilved viidi otsesel georefereerimisega vajalikku koordinaatide süsteemi (Hamzah, Said 2011: 20). Saadud tulemused on välja toodud tabelis 2, kus tegelikult mahuks on loetud 0,1m punktihedusega mõõdetud maht ja 0,3m punktihedusega on ära näidatud skaneerimise meetodil saadud maht.

**Tabel 2.** Skaneerimise meetodil ja tavapärase mõõtmismeetodil mõõdetud mahtude võrdlus (Hamzah, Said 2011: 26)

Nimetus	Skaneerimise meetod	Elektrontahhümeetriline mõõdistamise meetod
Maht (m <sup>3</sup> )	238,45 m <sup>3</sup>	225,83 m <sup>3</sup>
Tegelik maht	238,56 m <sup>3</sup>	238,56 m <sup>3</sup>
Mahu erinevus	0,11 m <sup>3</sup>	12,73 m <sup>3</sup>
Protsentuaalselt	99,95 %	94,66 %

Uuritava objekti mahu arvutamiseks võrreldi 3D mudeli mahtu aluspinnaga. 0,3 meetrise punktitiheidusega arvutatud mahu ja tegeliku mahu vahel oli 0,05 % erinevus. Tavapärase mõõtmismeetodi ja tegeliku mahu vahel oli 5,34 % suurune erinevus (Hamzah, Said 2011: 26). Skaneerimise meetodit kasutades näitab väiksem erinevuse protsent tegeliku mahuga võrreldes seda, et skaneerimise meetod on mahtude arvutamiseks tavapärasest mõõtmismeetodist täpsem (Hamzah, Said 2011: 26).

#### **Tahhümeetri ja laserskannerimise meetodite võrdlus Jakubcovice nad Odrou karjääri mõõtmisel**

Antud uurimistöö eesmärgiks oli välja selgitada kumb meetoditest on karjääris oleva aheraine mahtude arvutamiseks tõhusam, kas tahhümeetriline mõõdistamine või laserskaneerimine (Zapalkova jt 2011: 73). Mõõtmiste tulemusi kasutati kaevandatud materjali mahtude arvutamiseks, materjali reservi mahu arvutamiseks ja kaevandamise mahtu ajakohastamiseks (Zapalkova jt 2011: 74).

Tahhümeetriline karjääri mõõdistamine viidi läbi kahes etapis, esimene etapp toimus aprillis 2011 ja teine etapp viidi läbi juulis 2011, lisaks kasutati mõõtmiseks ka GNSS seadet. Mõõdistamine viidi kahes etapis läbi seetõttu, et võrrelda omavahel kahte 3D mudelit ja arvutada välja kaevatud aheraine maht (Zapalkova jt 2011: 75).

Laserskaneerimine viidi sarnaselt tahhümeetrilisele mõõdistamisele samuti läbi kahes etapis ja samadel aegadel. Esimeses etapis skaneeriti 20 seisupunkti ja teises etapis 29 seisupunkti, mõlemas etapis skaneeritud punktipilved transformeeriti riiklikku koordinaatide süsteemi (Zapalkova jt 2011: 79). Seejärel loodi ebaregulaarsete kolmnurkade võrgustiku, ehk TIN meetodiga kõrgusmodelid ning omavahel võrreldi

klassikalise geodeetilise mõõdistamise andmete põhjal tehtud mudelit laserskaneerimise andmete põhjal tehtud mudeliga (Zapalkova jt 2011: 82).

Mahtude arvutamisel võeti esimeses etapis arvatud maht aluseks ja võrreldi seda teisese etapis arvatud mahuga. Tahhümeetrilise mõõdistamise andmete põhjal tehtud mudelite järgi arvutati välja, et kolme kuu kaevandamise maht oli 88,879 m<sup>3</sup> (Zapalkova jt 2011: 85). Laserskaneerimise andmete põhjal tehtud mudelite põhjal saadi kolme kuu kaevandamise mahuks 75,648 m<sup>3</sup> (Zapalkova jt 2011: 86).

Võrreldes tahhümeetrilist mõõdistamist laserskaneerimisega annab laserskanneriga mõõdistamine objekti pinnast palju suurema detailsusega andmed. Tahhümeetriga mõõtes mõõdetakse ainult objekti reljeefi servad ja seetõttu vähendab see 3D mudeli täpsust ja ka mahuarvutuste täpsust (Zapalkova jt 2011: 87). Laserskaneerimise tugevusteks on võimalus kasutada seda raskesti ligipääsetavates kohtades, kus tööohutus ja tööturvishoiu nõudeid ei saa tagada, kuid eelkõige annab laserskaneerimine meile suurema tihedusega ja kvaliteetsema andmestiku. Laserskaneerimise meetodit võiks tulevikus kasutada kaevanduste ja karjäärade mahtude dokumenteerimiseks ning jälgimiseks. Sellega saaks täiustada praeguseid aerofotogramm-meetrilisi ja tahhümeetrilisi meetodeid (Zapalkova jt 2011: 87).

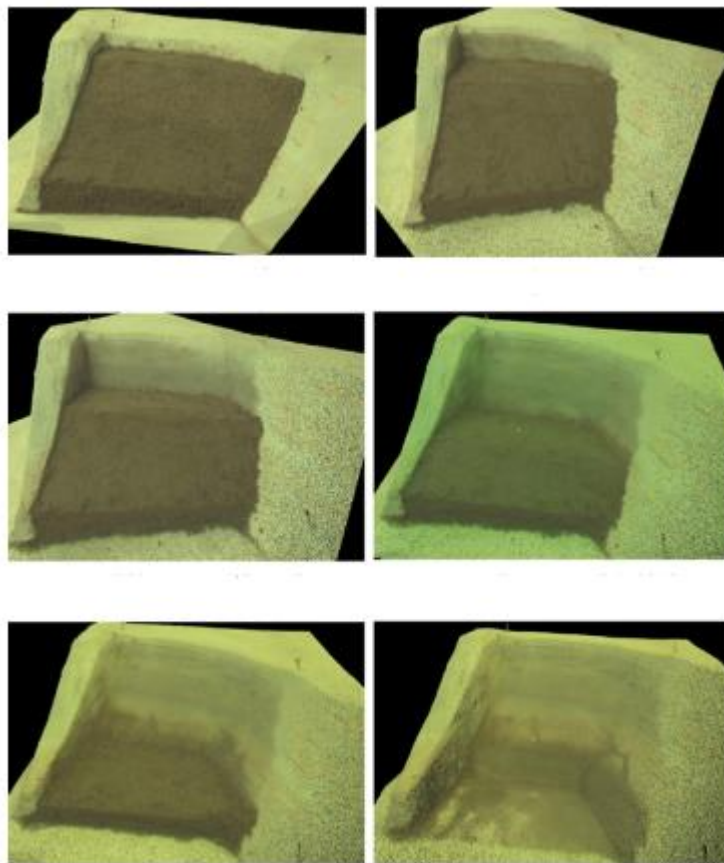
### **Nõlvade kaevamise kvaliteedi hindamine ja kaevamise mahu arvutamine hüdrotehnilistes projektides kasutades laserskaneerimise tehnoloogiat**

Uurimistöö eesmärgiks oli demonstreerida 3D laserskaneerimise tehnoloogia abil nõlvade kaevamise kvaliteedi hindamist ja kaevamise mahu arvutamist. Uuritud meetodeid võrreldi laborikatsetega (Hu jt 2015: 165). Projekti kaevandamise mahu arvutamiseks oli nõlv jaotatud mitmeks horisontaalseks kihiks, mille ristlõike pindala korrutati kihi paksusega ja saadi teada antud kihi kaevamise maht. Kogu kaevamise mahu saamiseks liideti kõik kaevandatud kihid kokku. Mõõdistamised viidi läbi Edela Hiinas hüdroelektrijaama ehitusobjektil ning laboratoorsed katsed Hiina Three Gorges Ülikoolis (Hu jt 2015: 165).

Töö autorite seisukohast on nõlvade kaevamine hüdrotehnilistes projektide ehitamisel üks kõige olulisemaid samme. Kaevamise kvaliteedi hindamine ja kaevatud mahu arvutamine on antud projektide juhtimisel kriitilise tähtsusega. Efektiivsuse tõstmiseks ja mahuarvutuste täpsuse suurendamiseks kasutati nõlva kaevetööde kvaliteedi hindamiseks

3D laserskaneerimise tehnoloogiat (Hu jt 2015: 164). Hüdrotehniliste projektide puhul on enne tammide, veekanalite ja vundamentide ehitamist vaja kaevata nõlvad. Kaevamise kvaliteet mõjutab otseselt eelpool mainitud objektide põhistruktuuride stabiilsust ja ohutust. Kaevamise protseduuride tõhus ja täpne kontroll vähendab ebavajalike tööde hulka ja kulusid ning aitab tellijal, töövõtjal ja järelevalvel omavahelisi erimeelsusi lihtsamalt lahendada (Hu jt 2015: 164).

Laboratoorsetel katsetel kasutati 0,5 m pikkust, 0,6 m laiust ja 0,25 m kõrgust mudelit, mis skaneeriti kuues etapis ning iga etapp arvutati kaevamise maht (joonis 11) (Hu jt 2015: 170).



**Joonis 11.** Laboratoorsetel katsetel kasutatud mudel (Hu jt 2015: 170).

Skaneerimise andmete põhjal arvutatud väljakaeve mahtu võrreldi teada oleva mahutavusega puidust kasti kasutades (Hu jt 2015: 171).

Nõlva kaevamise kvaliteedi hindamisel on laserskaneerimise andmed võrreldes elektrontahhümeetriliste, GPS ja RTK mõõdistamise andmetega võrreldes palju

üksikasjalikumad ja täpsemad. Kaevamise mahu arvutamine laserskaneerimise andmete põhjal on väga täpne ja see erines labori katsetel - 0,637 %, mis näitab skaneerimise häid kasutusvõimalusi kaevamise mahtude arvutamisel (Hu jt 2015: 172).

### **3D laserskaneerimine ja GPS tehnoloogia kasutamine maalihke mullatööde mahu hindamiseks**

Antud uurimistöö eesmärgiks on arvutada mullatööde maht peale maalihet. Täpsemalt kirjeldatakse juhtumiuuringut, mis tehti laserskaneerimise ja GPS süsteemi kasutamise kohta maalihete andmete saamiseks ja mullatööde mahtude arvutamiseks (Du, Teng 2006: 657).

Taifuuni tõttu sadas Taiwanis kahe päeva jooksul 15 000 mm sademeid ja seetõttu toimus Taiwani loodeosas maalihe (joonis 12).



**Joonis 12.** Uuritava maalihke mullatööde mahu mõõtmine (Du, Teng 2006: 659).

Antud olukord oli väga kriitiline ja maalihke likvideerimiseks oli kiiresti vaja välja arvutada kaevamise ja täitmise maht. Tõhususe ja täpsuse pärast valiti mahtude määramiseks 3D laserskanner ja GPS seade. GPS seadme abil määrati neljale tähisele koordinaadid ning skaneeritud punktipilv transformeeriti riiklikku koordinaatide süsteemi (Du, Teng 2006: 658). Kasutatud laserskanneri orienteerimiseks tuli enne skaneerimist kõigepealt skaneerida kontrollpunktidenä kasutatud tähised, tähistena kasutati reflektor pabereid (Du, Teng 2006: 659).

Laserskaneerimise andmete põhjal mahu arvutamisel saadi tulemuseks, et maalihke tõttu tuleb pinnast kaevata  $1\,221\,507,5\text{ m}^3$  ja täita  $29\,610,8\text{ m}^3$  (Du, Teng 2006: 662). Tulemuste põhjal võib öelda, et laserskanneri ja GPS-i koos kasutamine töötasid objekti 3D mudeli koostamisel hästi. Antud objekti puhul ei pruugi maht olla väga täpne, kuid selle uuringuga rõhutatakse seda, et vahel on tarvis saada kriitilisest olukorrast esialgset hinnangut. Kasutatud meetodiga oli võimalik kiiresti mõõdistada objekti reljeefi ja vältida inimlikke eksimusi (Du, Teng 2006: 663).

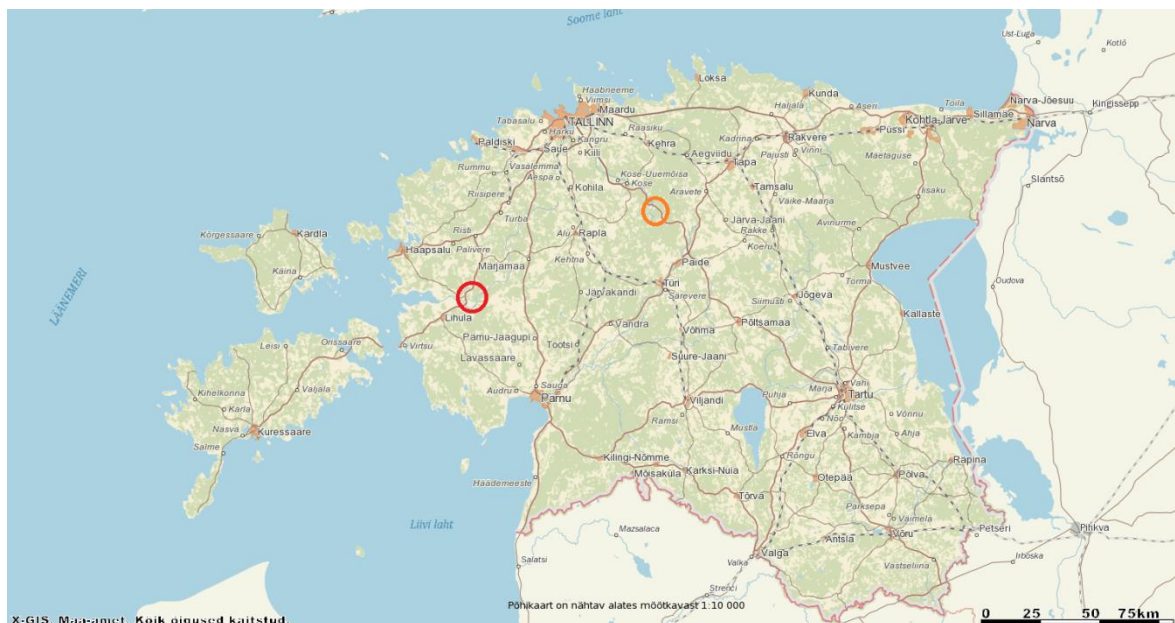
## 2. MATERJAL JA METOODIKA

### 2.1 Uurimistöö objekt ja kasutatud vahendid

Antud uurimistöö viidi läbi koostöös Eesti Maaülikooli ja Raxoest OÜ-ga. Uurimistöös uuriti kahte puistangu kuhilat, edaspidi uurimisobjektide mahtu ehk ruumala.

Esimene uurimisobjekt on turbaaun Laiküla turbarabas. Objekti aadress Üdruma küla, Lääne-Nigula vald, Lääne maakond.

Teine uuritav objekt on purustatud kruusa kuhila Karude karjääris. Objekti aadress Mustla-Nõmme küla, Paide linn, Järva maakond. Objektide asukohad on välja toodud joonisel 13.



**Joonis 13.** Laiküla objekt kaardil märgitud punasega ja Karude objekt oranžiga (Maaameti geoportaal).

Uurimistöö GNSS mõõtmisteks kasutati Trimble R4 GNSS seadet koos TSC-3 väliarvutiga (joonis 14).





**Joonis 14.** Trimble R4 GNSS seade (Trimble).

Mõõtmisteks kasutatud GNSS süsteemi parameetrid on välja toodud tabelis 3.

**Tabel 3.** Trimble R4 GNSS süsteemi parameetrid (Trimble)

Samaaegselt jälgitavad satelliidisignaalid	GPS: L1C/A, L1C, L2C, L2E GLONASS: L1C/A, L1P, L2C/A, L2P, L3 SBAS: L1C/A Galileo: E1, E5A, E5B BeiDou (COMPASS): B1, B2
Positsioneerimise uuendamissagedus	1 Hz, 2 Hz, 5 Hz ja 10 Hz
Asukoha määramise täpsus DGPS mõõtmisel	Horisontaalne: 0.25 m + 1 ppm RMS Vertikaalne: 0,50 + 1 ppm RMS SBAS < 5 m 3DRMS
Asukoha määramise täpsus staatilisel mõõtmisel	Horisontaalne: 3 mm + 0.1 ppm RMS Vertikaalne 3,5 mm + 0.4 ppm RMS
Asukoha määramise täpsus kiirstaatilisel mõõtmisel	Horisontaalne: 3 mm + 0.5 ppm RMS Vertikaalne: 5 mm + 0.5 ppm RMS
Initsialiseerimise aeg	Tüüpiliselt < 8 sekundit

Staatiliseks laserskaneerimise läbiviimiseks kasutati skaneerivat elektrontahhümeetrit Trimble SX10 (joonis 15).



**Joonis 15.** Trimble SX10 skaneeriv elektrontahhümeeter (Geosoft).

Täpsemad elektrontahhümeetri laserskaneerimise parameetrid on välja toodud tabelis 4.

**Tabel 4.** Trimble SX10 tahhümeetri parameetrid (Geosoft)

Nurga mõõtmistäpsus	1 "
Prismaga kauguse mõõtmistäpsus	1 mm + 1.5 ppm
Prismaga mõõtmiskaugus	1 m – 5500 m
Skaneerimise põhimõte	Teleskoobis pöörlev prisma
Mõõtmiskiirus	26,6 kHz ehk 26 000 p/s
Punkti vahe	6.25 mm, 12.5 mm, 25 mm või 50 mm distsantsil 50 m
Vaateväli	360° x 300°
Jäme skaneerimine	Skaneerimise aeg 12 min
Standard skaneerimine	Skaneerimise aeg 6 min
Skaneerimise kaugus	0.9 – 600 m
Laseri spetsifikatsioon	Impulsslaser 1550nm, laserklass 1M
Laseri punkti suurus	100 m kaugusel 14 mm

Andmete töötlemiseks kasutati *Trimble Business Centre* tarkvara, *Autodesk ReCap* tarkvara, *Autodesk AutoCAD Civil 3D 2019* tarkvara ning *Microsoft Excel* tarkvara.

## 2.2 Uurimistöös kasutatud andmed ja meetodika

Lähtudes uurimistöö eesmärgist, milleks on uurida puistangu mahtude määramise täpsust staatilise laserskaneerimise andmete põhjal, jagati töö meetoodika järgmisteks etappideks:

- ettevalmistustööd;
  - objektide valik;
  - objektide markeerimine;
- andmete kogumine;
  - GNSS mõõdistamine;
  - staatiline laserskaneerimine;
- andmete töötlemine;
  - GNSS andmete põhjal 3D mudelite koostamine;
  - skaneerimise andmete põhjal 0,05 m punkti tihedusega 3D mudelite koostamine;
  - skaneerimise andmete põhjal 0,1 m punkti tihedusega 3D mudelite koostamine;
  - skaneerimise andmete põhjal 0,3 m punkti tihedusega 3D mudelite koostamine;
  - skaneerimise andmete põhjal 0,5 m punkti tihedusega 3D mudelite koostamine;
- tulemuste analüüs.

Järgnevalt on etapid erinevate objektide põhjal täpsemalt lahti seletatud.

### **2.2.1 Uurimistöö läbiviimine Laiküla turbaraba objektil**

**Ettevalmistustööd** koosnesid mahtude määramiseks sobiliku objekti valimisest. Laiküla turbaraba objekt valiti välja koostöös Eesti Maaülikooli, Raxoest OÜ-ga ning geodeet Kaido Põrk`iga. Objektide välja valimisel olid kriteeriumiteks skaneeritava objektide suurus, materjal ning kuju ja värvus. Esimesel objektil Laiküla turbarabas (joonis 16) viidi mõõtmised läbi 24. oktoobril 2017. aastal.



**Joonis 16.** Laiküla turbaraba objekt.

Mõõtmiste ajal oli ilmastik pilvitu ja temperatuur paar kraadi miinuses. Laiküla objekt valiti mõõdistamiseks, kuna turbaauna on GNSS meetodil raske mõõta ning geodeedid otsivad turbaaunade mahtude määramiseks alternatiivseid meetodeid, üheks alternatiiviks ongi staatiline laserskaneerimine. Külmunud pinnase tõttu oli turbaaunal võimalik liikuda, pluss kraadidega oleks see olnud väga raske, kuna turvas vajub väga kergelt kokku.

Enne laserskaneerimist viidi läbi **objekti markeerimine**, mille käigus paigaldati objektile tähised, mida kasutati kontrollpunktidenä aeromõõdistamisel teise uurimistöö tegemisel.

Laiküla objektile paigaldati 21 tähist, neist 12 aerosoolvärviga ja 9 spetsiaalset tähist (joonis 17).



**Joonis 17.** Objektidele paigaldatud tähised.

Antud uurimistöös kasutati ühte paigaldatud tähis andmetöötamise protsessis ning kuute tähist kasutati skaneeriva elektrontahhümeetri orienteerimiseks. Peale tähiste paigaldamist alustati andmete kogumisega.

**Andmete kogumiseks** GNSS mõõdistamisel kasutati Eesti Maaülikooli Trimble R4-3 GNSS seadet ja laserskaneerimiseks Raxoest OÜ Trimble SX10 skaneerivat elektrontahhümeetrit.

**GNSS meetodil** mõõdeti kõigepealt Laiküla objekti reljeef ja kontrollpunktid (joonis 18) Trimble R4-3 GNSS seadmega, reaalsajas parandite saamiseks kasutati Maa-ameti püsijaamade võrku.



**Joonis 18.** Laiküla objekti reljeefi GNSS mõõdistamine (Natalja Liba).

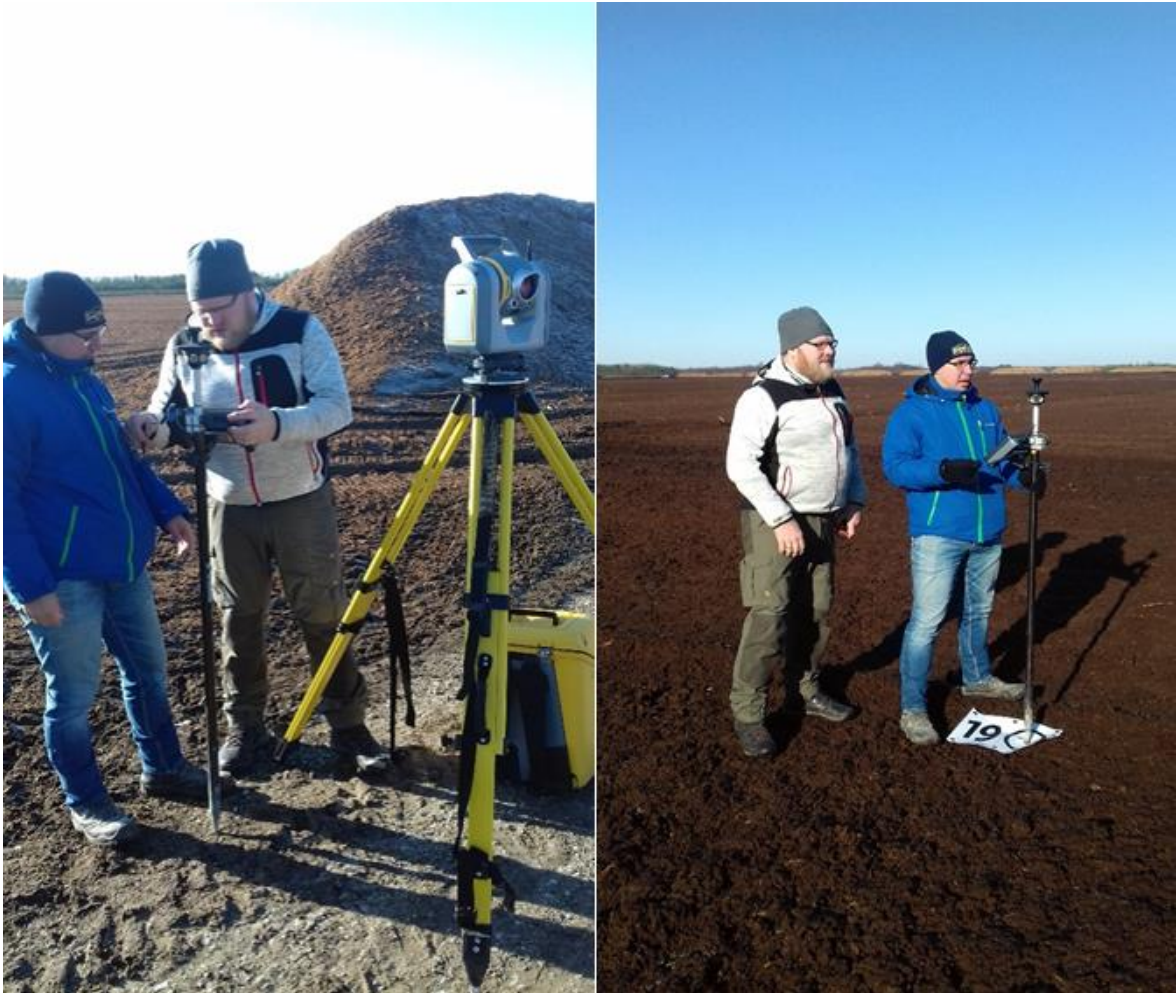
Laiküla objektile mõõdeti GNSS meetodil 20 punkti, väljavõte andmetest on joonisel 19.

	A	B	C	D
1	m1	6512612.885	502081.716	11.287
2	k1	6512612.899	502081.698	11.280
3	k2	6512613.756	502072.131	11.412
4	k3	6512614.983	502064.268	11.170
5	m3	6512614.981	502064.273	11.165
6	k4	6512615.360	502055.762	11.261
7	k5	6512614.815	502047.254	11.370
8	m5	6512614.823	502047.268	11.373
9	m2	6512618.857	502049.574	8.844
10	m6	6512616.735	502088.905	8.280
11	k6	6512616.743	502088.904	8.283
12	m4	6512612.149	502086.061	9.057
13	m7	6512610.524	502066.096	8.961
14	m8	6512611.512	502054.064	9.021
15	m9	6512614.353	502033.109	8.086
16	k10	6512610.697	502043.503	8.172
17	...			

**Joonis 19.** Väljavõte Laiküla objektil mõõdetud GNSS andmetest.



**Andmete kogumisel staatilise laserskaneerimise meetodil** Laiküla objektil mõõdeti GNSS seadme abil objektile ja selle lähedusse paigaldatud tähiste koordinaadid, mida kasutati skaneeriva tahhümeetri orienteerimiseks (joonis 20).



**Joonis 20.** Laiküla turbaraba objektil skaneeriva tahhümeetri orienteerimine (Natalja Liba).

Laserskaneerimise seisupunktide väljavalimisel lähtuti sellest, et erinevatest seisupunktidest tehtud skaneeringutel oleks omavaheline ülekate ning objekti pind oleks täielikult skaneeritud. Tahhümeeter orienteeriti enne laserskaneerimist vabajaama meetodil. Iga laserskaneerimise seisupunkti orienteerimiseks kasutati kolme eelnevalt Trimble R4-3 GNSS mõõdetud tähist. Elektrontahhümeetri skaneerimise seadetest määrati skaneeritav polügoon ja valiti jäme skaneerimise tihedus. Jämeda skaneerimise tihedusega on seadmest 10 m kaugusel skaneeritavate punktide omavahelised vahekaugused 1 cm. Laiküla objekt skaneeriti neljast seisupunktist.

## 2.2.2 Uurimistöö läbiviimine Karude karjääri objektil

**Ettevalmistustööd** Karude karjääri objekti valikul oli valida ebakorrapärase kujuga objekt, mida oleks GNSS meetodiga aeganõudev ja keeruline mõõta. Karude karjääri objekti mõõdistamised toimusid 10. aprill. Ilmastik oli pilvitu, kuid tuuline.

**Objekti markeerimine** viidi läbi sarnaselt Laiküla objektile, kuid Karude objektile paigaldati ainult spetsiaalsed tähised, 19 tk. Antud töö puhul kasutati andmetöötluses ühte tähist.

**Andmete kogumine GNSS meetodil** viidi läbi sarnaselt eelneva objektiga, kuid Karude objekt oli keerukama reljeefiga ning seetõttu mõõdeti sinna GNSS meetodil rohkem punkte. Objekti reljeef (joonis 21) mõõdeti umbes 1 meetrise punkti sammuga ning kokku mõõdeti 100 punkti. Reaalajas parandite saamiseks kasutati Maa-ameti püsijaamade võrku.



**Joonis 21.** Karude karjääri objekti reljeefi mõõdistamine GNSS meetodil (Kaupo Kokamägi).

**Andmete kogumisel staatilise laserskaneerimise meetodi puhul** skaneeriti Karude karjääri objekt skaneerimise vigade vältimiseks ning täpsuse hindamiseks kaks korda. Seisupunktide valikul lähtuti eespool mainitud nõuetest. Enne skaneerimist märgiti GNSS meetodil objekti lähedusse maha kindelpunktid, mida kasutati skaneeriva tahhümeetri



vabajaama meetodil orienteerimiseks. Objekt skaneeriti (joonis 22) jämeda skaneerimise tihedusega esimese punktipilve koostamiseks neljast seisupunktist.



**Joonis 22.** Karude karjääri objekti laserskaneerimine.

Teine punktipilv skaneeriti samuti jämeda skaneerimise tihedusega neljast seisupunktist mida ei olnud eelnevalt kasutatud. Ühes seisupunktis skaneeritud punktipilves on umbes 200 000 punkti (joonis 23).



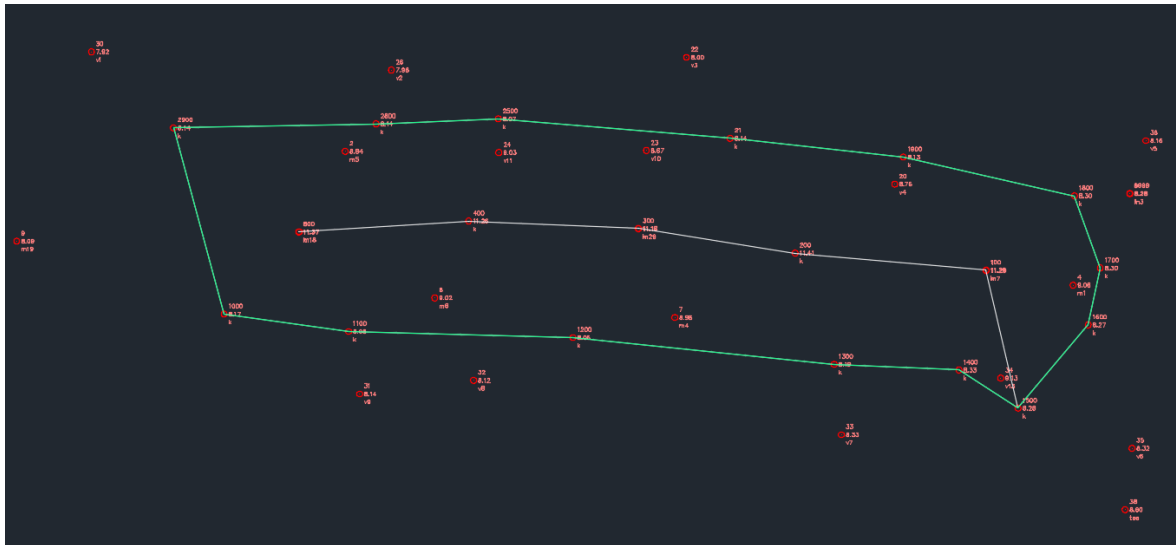
**Joonis 23.** Trimble SX10 laserskaneerimise seaded.

Objekti neljast seisupunktist skaneerimisel on registreeritud punktipilve kogumaht umbes 800 000 punkti. Peale uuritavate objektide GNSS mõõdistamist ja laserskaneerimist jätkati andmete töötlemisega. Andmetöötlus on kirjeldatud järgmises peatükis.

### 2.2.3 Andmete töötlemine

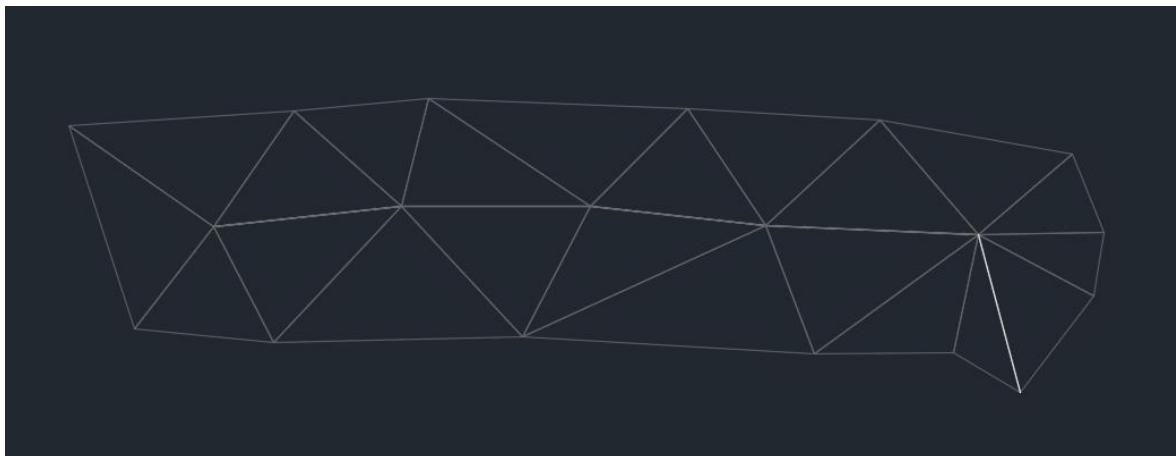
Kogutud andmete põhjal koostati mõlema mõõdetud objekti kohta GNSS meetodiga üks 3D mudel ning staatilise laserskaneerimise andmete põhjal Laiküla turbaraba objekti kohta neli 3D mudelit ja Karude karjääri objekti kohta kaheksa 3D mudelit.

**GNSS meetodil** mõõdetud andmete põhjal 3D mudeli koostamiseks kasutati *Autodesk AutoCAD Civil 3D 2019* tarkvara. *Autodesk AutoCAD Civil 3D 2019* tarkvaras ühendati omavahel joonega mõõdetud Laiküla objekti alumise kontuuri punktid ja ülemise kontuuri punktid (joonis 24).



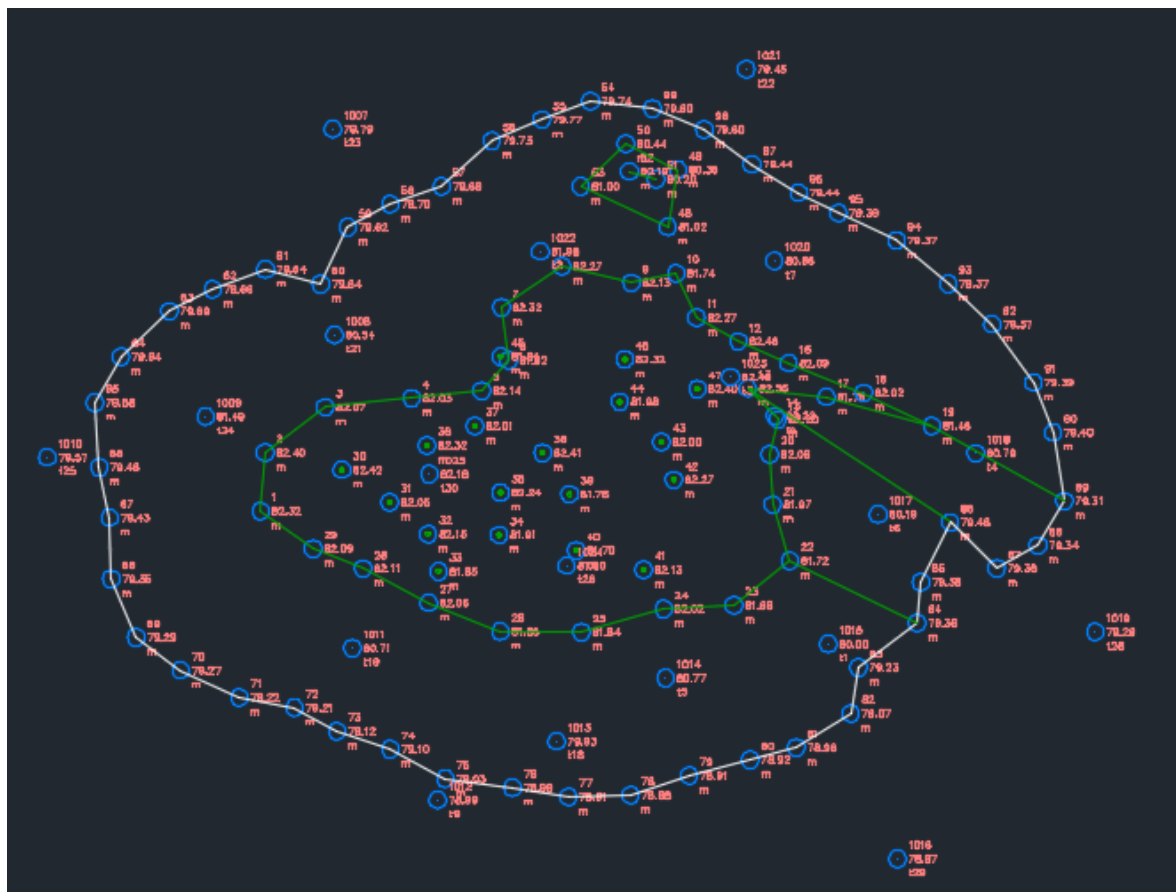
**Joonis 24.** Laiküla turbaraba objekti GNSS mõõdistuse kontuur pealtvaates.

Seejärel loodi ülemise ning alumise pinna abil kasutades TIN mudeldamise meetodit ja Kriging interpolateerimise meetodit 3D mudelpind. Laiküla objekti GNSS model on näidatud joonisel 25.



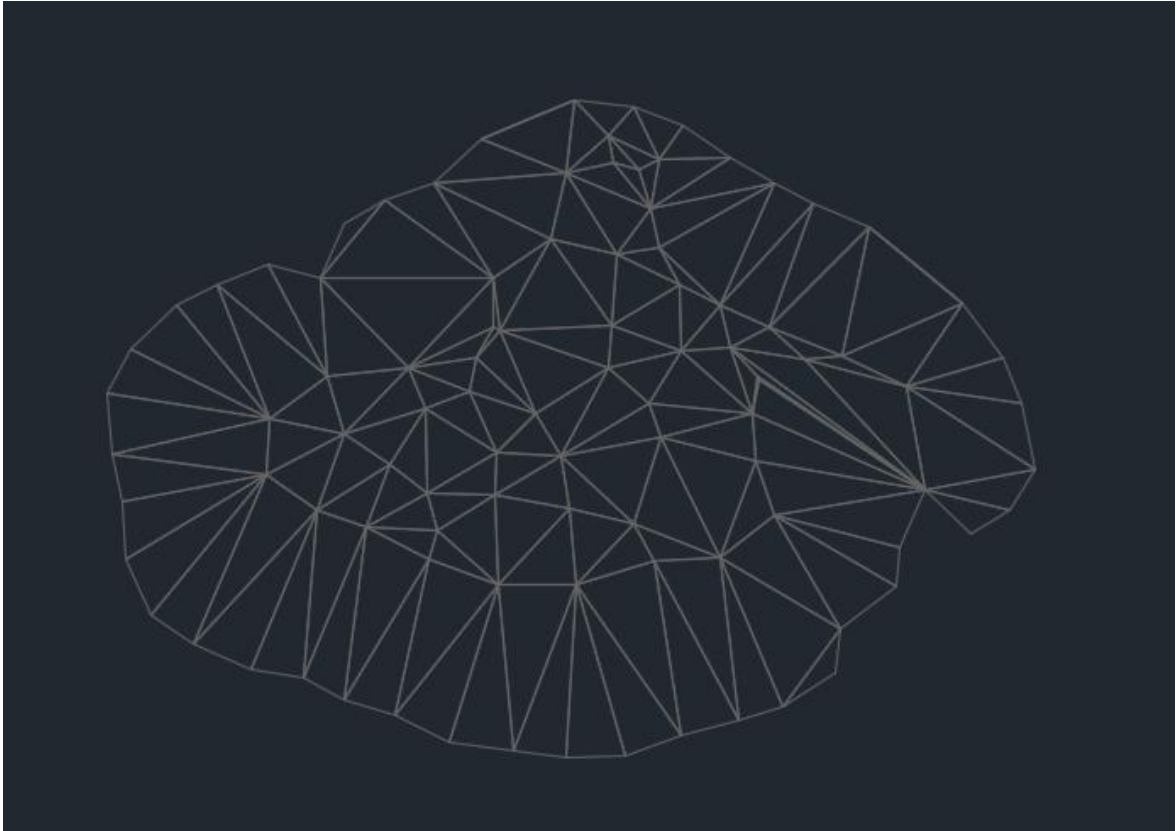
**Joonis 25.** Laiküla turbaraba objekti GNSS mõõdistuse 3D mudel pealtvaates.

Mahu arvutamiseks võrreldi sarnaselt eelmiste meetoditega mudelpinda aluspinnaga ja nii saadi teada GNSS meetodil mõõdetud objekti maht. Sama meetodit kasutati ka Karude karjääri objekti puhul, kus ühendati mõõdetud punktid (joonis 26).



**Joonis 26.** Karude karjääri objekti GNSS mõõdistuse kontuur pealtvaates.

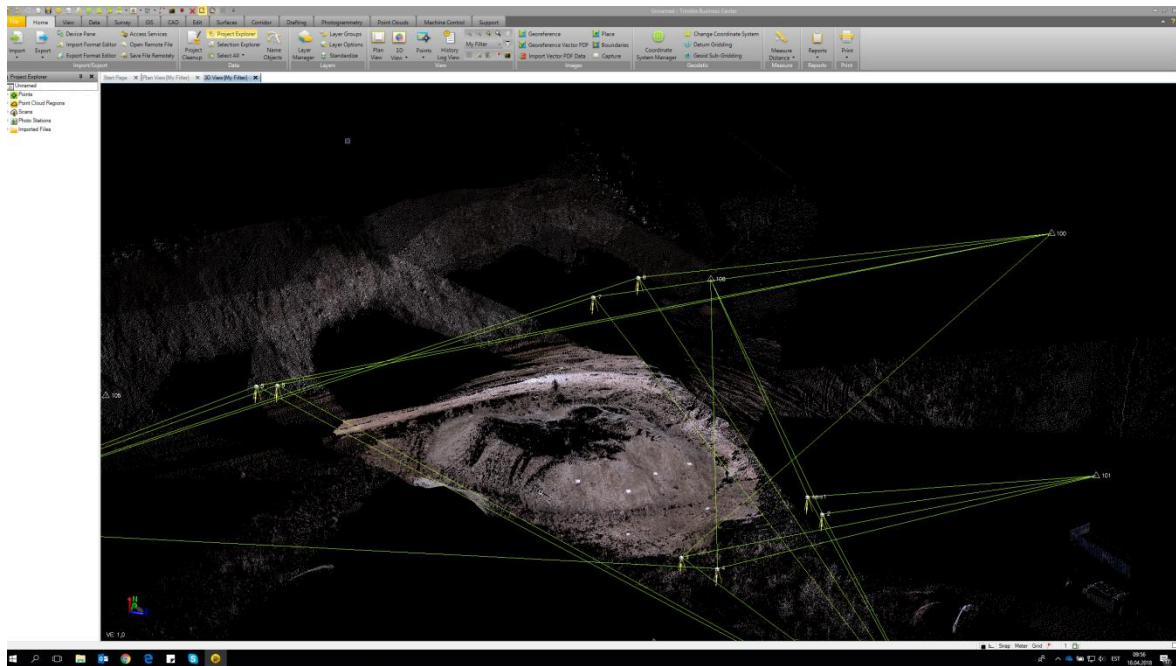
Peale alumise ja ülemise kontuuri ühendamist tehti alumise ja ülemise kontuuri abil TIN meetodi ning Kriging interpoleerimise meetodiga 3D mudel (joonis 27).



**Joonis 27.** Karude karjääri objekti GNSS mõõdistuse 3D mudel pealtvaates.

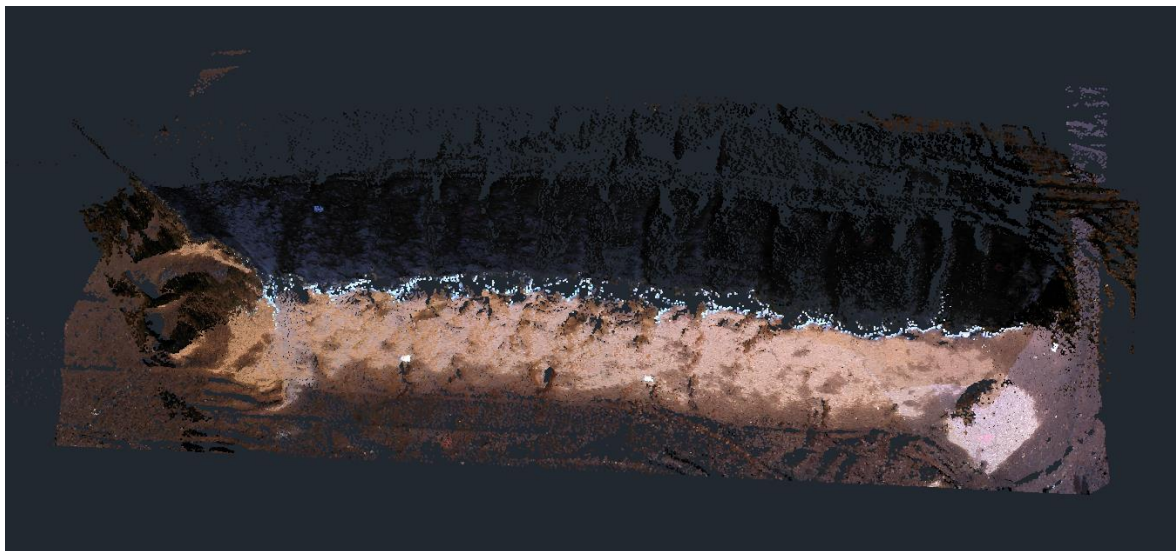
Selleks, et teada saada, kas ja kui palju mõjutab erineva punktitiheusega mudeli kasutamine mahtude arvutamise täpsust, tehti **laserskaneerimise andmete põhjal** Laiküla turbaraba objekti kohta neli 3D mudelit ja Karude karjääri objekti kohta kaheksa 3D mudelit. Punktipilvede registreerimine viidi läbi Raxoest OÜ-s, kasutades *Trimble Business Centre* tarkvara (joonis 28).





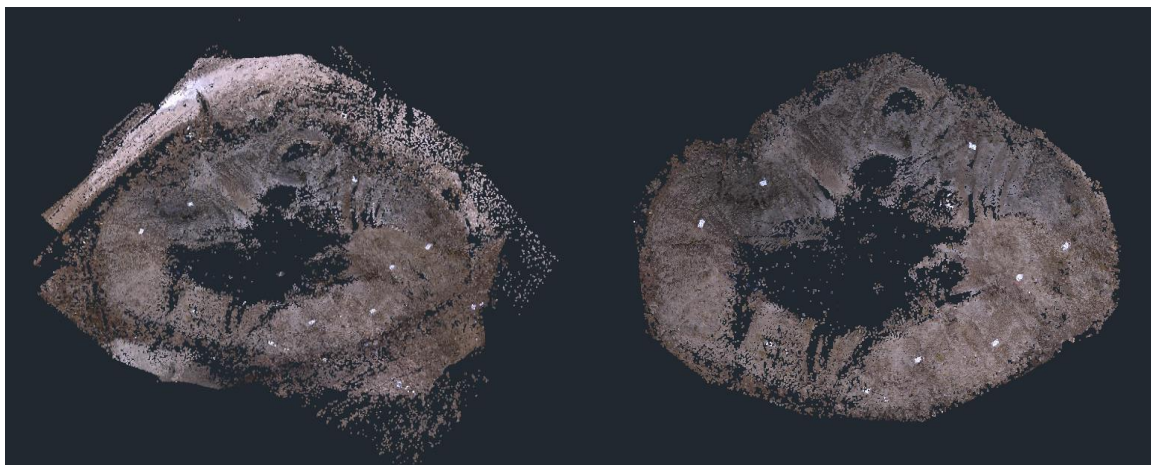
**Joonis 28.** Otsese georefereerimisega registreeritud puhastamata punktipilv (Mart Rae).

Peale *Trimble Business Centre* tarkvaras skaneeritud punktipilvede registreerimist puhastati punktipilved *Autodesk ReCap* tarkvaras. *ReCap* tarkvaras kustutati juba registreeritud punktipilvedest üleliigsed punktid. Laiküla turbaraba objektist puhastatud punktipilv on näidatud joonisel 29.



**Joonis 29.** Laiküla turbaraba objekti puhastatud punktipilv pealtvaates.

Karude karjääri objektil puhastati kaks registreeritud punktipilve, punktipilved A ja B (joonis 30).



**Joonis 30.** Karude karjääri objekti puhastatud punktipilved A (vasakul) ja B (paremal) pealtvaates.

Karude karjääris skaneeritud purukruusa kuhila ääres kustutati võsa ja infotahvlid, mille laserskanner oli peale mõõtnud.

Järgnevalt loodi *Autodesk AutoCAD Civil 3D 2019* tarkvaraga punktipilvedest 3D mudelid, kasutades TIN mudeldamise meetodit ja Kriging interpoleerimise meetodit.

Vastavalt eelnevalt kirjutatule koostati erineva punktitiheusega mudelid selleks, et teada saada kui palju sõltub mudeli põhjal arvutatud maht mudeldamiseks kasutatud punktide tihedusest.

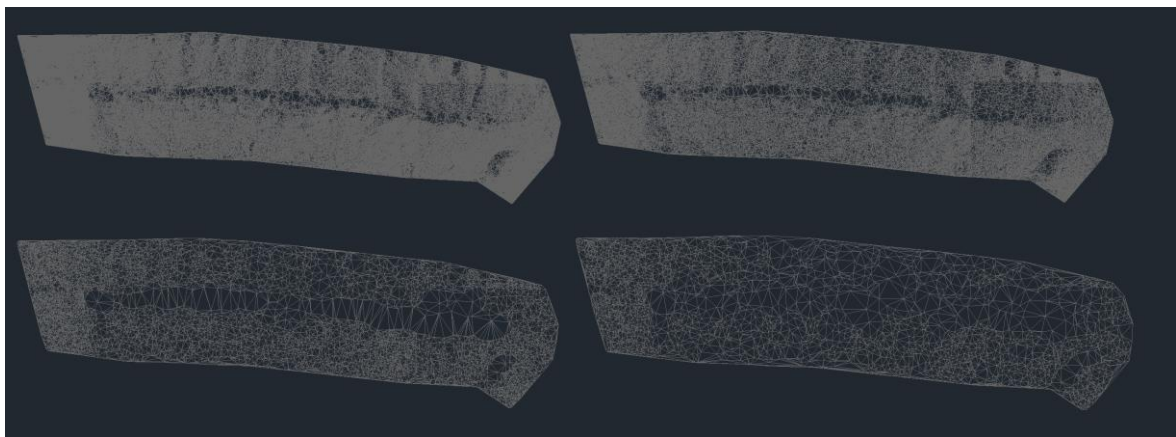
Kõige tihedama mudeli puhul valiti punktide omavaheliseks vahekauguseks 0,05 m, sest antud meetodit on varem kasutatud Malaisia Tehnikaülikoolis Hamzah ja Saidi poolt 2011. aastal tehtud uurimistöös puistangu mahu mõõtmisest, mille ülevaade on antud peatükis 1.4, kus loeti õigeks mahuks laserskaneerimise andmete põhjal tiheda punktivahega koostatud 3D mudel ning võrreldi seda hõredamate mudelitega ja teiste mõõtmismeetoditega kogutud andmete põhjal koostatud mudeliga.

Hõredamate mudelite jaoks suurendati kasutatavate punktide omavahelist kaugust, vastavalt 0,1 m, 0,3 m ja 0,5 m. 3D mudeleid hõrendati, et vähendada 3D mudeli mahtu, lisaks üldistati neid soovitud tasemele, et võrrelda mahu erinevust.

Peale skaneerimise andmete põhjal 3D maakatte mudeli loomist tehti *AutoCAD Civil 3D 2019* tarkvaras skaneeritud objekti alumise kontuuri järgi aluspind, millega eelnevalt tehtud mudeli pinda mahu arvutamiseks võrrelda. Aluspinna mudeli tegemisel kasutati samuti TIN meetodit. Aluspinna tegemiseks kasutati GNSS meetodil mõõdetud objekti nõlvade aluspunkte, mis tõsteti skaneeritud andmete põhjal tehtud mudelisse. Mahu arvutamiseks vajaliku aluse õigele kõrgusele tõstmiseks võeti mõlema objekti puhul kasutusele kontrollpunkt, mis oli eelnevalt skaneeritavale objektile paigaldatud ja GNSS meetodil mõõdetud.

Järgneval kasutati *AutoCAD Civil 3D 2019* tarkvara analüüsi moodulit *analyse* ning *volume dashboard*, aluspinna ja mudelpinna abil mahu arvutamiseks. Nende omavahelise võrdlemise tulemusena saadi teada laserskaneerimise meetodil mõõdetud objekti maht.

Laiküla turbaraba objekti puhul tehti registreeritud punktipilve põhjal 3D mudelid 0,05 m, 0,1 m, 0,3 m ja 0,5 m punktide vahega (joonis 31).

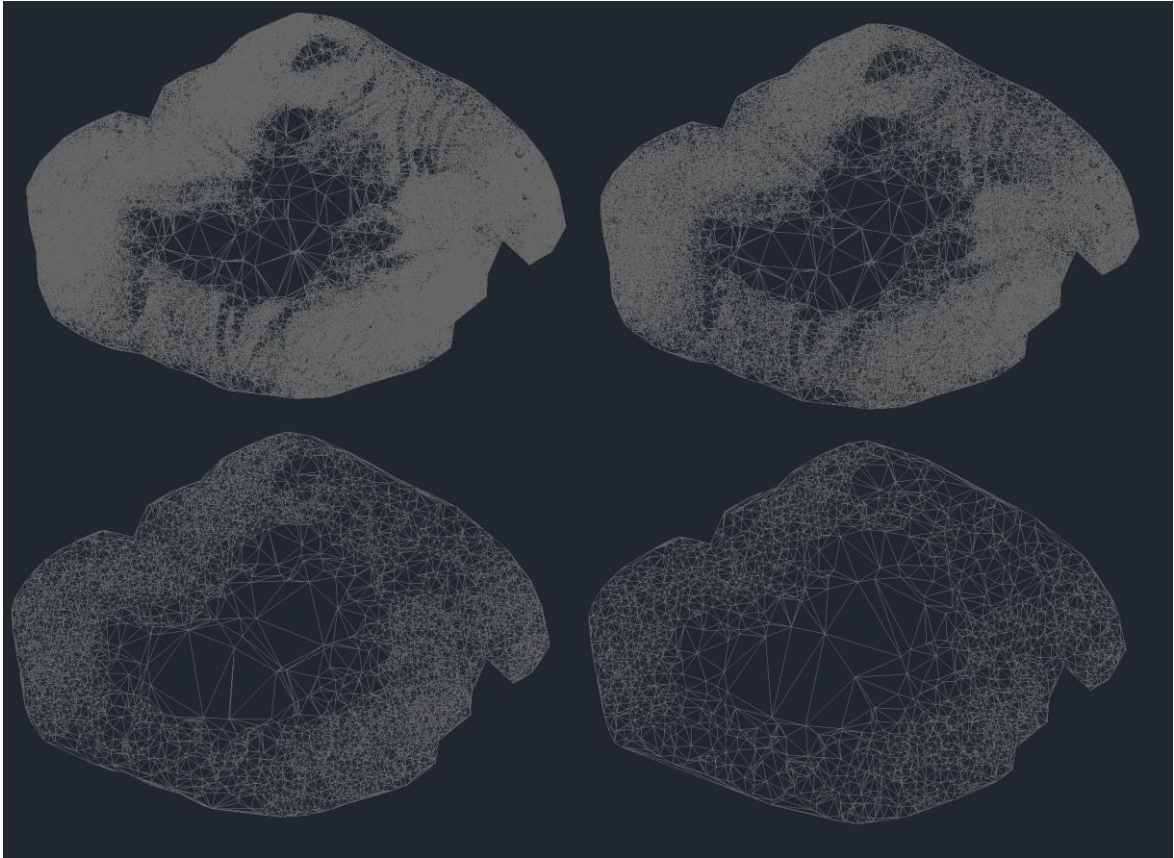


**Joonis 31.** Laiküla turbaraba objekti põhjal tehtud erineva punktitiheusega 3D mudelid pealtvaates.

Kõikidele mudelitele arvutati ka mahud. Õigeks mahuks loeti kõige tihedama mudeli põhjal arvutatud maht. Laiküla turbaraba objekti kohta tehtud 3D mudelid on näidatud lisades 1 kuni 4.

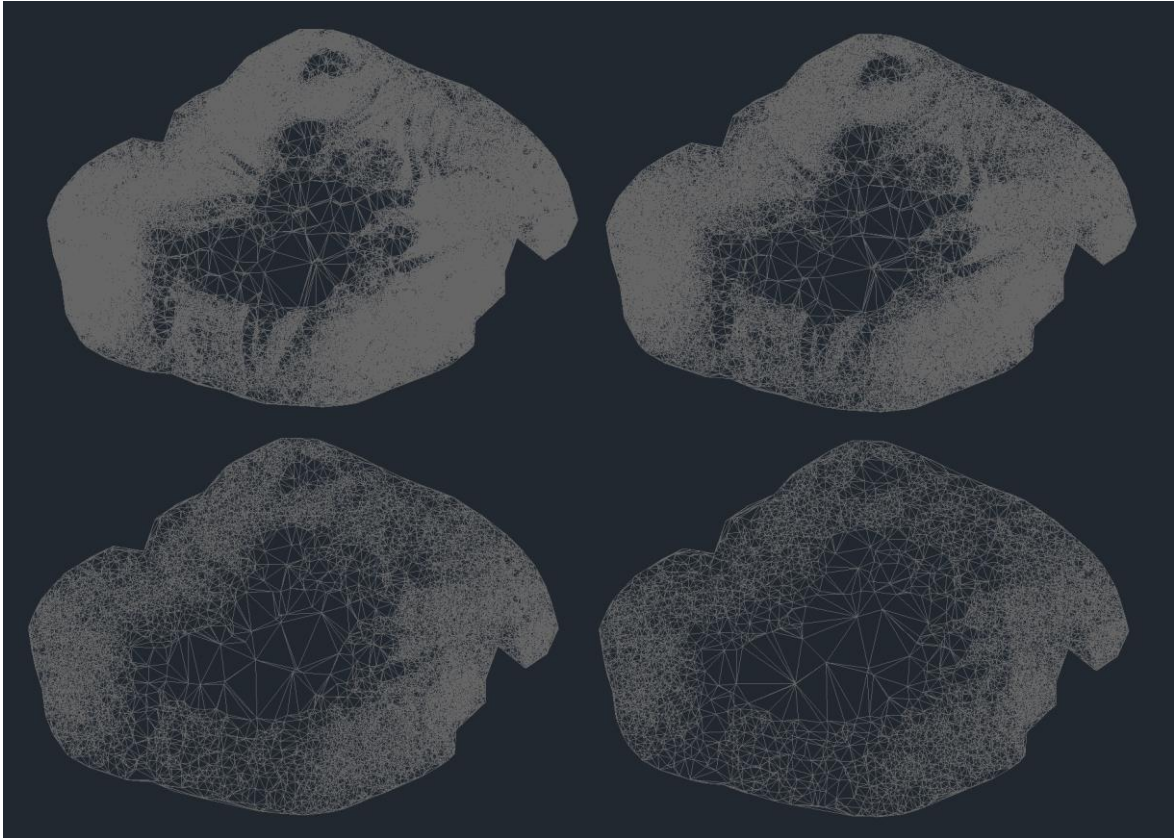
Karude karjääri objekti puhul tehti 3D mudelid punktipilve A põhjal tihedusega 0,05m ning tihedusega 0,1 m, 0,3 m ja 0,5 m (joonis 32).





**Joonis 32.** Karude karjääri objekti punktipilve A põhjal tehtud 3D mudelid pealtvaates.

Punktipilve B põhjal tehti 3D mudelid samuti tihedusega 0,05 m ning 0,1 m, 0,3 m ja 0,5 m (joonis 33).



**Joonis 33.** Karude karjääri objekti punktipilve B põhjal tehtud 3D mudelid pealtvaates.

Lisaks võrreldi omavahel punktipilve A ja punktipilve B põhjal arvutatud mahte. Mõlema punktipilve põhjal tehtud 3D mudelite õigeks mahuks 0,05 m punktitiheusega mudelite põhjal arvutatud maht. Punktipilve A põhjal tehtud 3D mudelid on näidatud lisas 5 kuni 8 ning punktipilve B põhjal tehtud 3D mudelid on näidatud lisades 9 kuni 12.

**Andmete analüüsiks** kasutati *Microsoft Excel* tarkvara. Microsoft Excelis koondati arvutatud mahud tabelitesse ja võrreldi omavahel GNSS ning skaneerimise andmete põhjal arvutatud mahte ja nende suhtelisi erinevusi. Saadud tulemused ja andmete analüüs on välja toodud järgmises peatükis.

### 3. TÖÖ TULEMUSED NING ARUTELU

#### 3.1 Objektide mahtude arvutamise tulemused

Laiküla turbaraba GNSS meetodil saadud andmete põhjal arvutatud objekti maht on 680,55 m<sup>3</sup>, staatilise laserskaneerimise andmete põhjal arvutatud maht on 723,10 m<sup>3</sup>, kus objekti õigeks mahuks loeti 0,05 m punkti vahega 3D mudeli põhjal arvutatud maht. Lisaks on tabelis 5 välja toodud laserskaneerimise andmete põhjal tehtud 3D mudelite erinevate punktide vahekaugustega arvutatud Laiküla objekti mahud.

**Tabel 5.** Laiküla turbaraba objekti arvutatud mahud

	Skaneerimise andmete põhjal mudel I	Skaneerimise andmete põhjal mudel II	Skaneerimise andmete põhjal mudel II	Skaneerimise andmete põhjal mudel IV	GNSS andmete põhjal mudel
<b>Punktitihe m</b>	0,05	0,1	0,3	0,5	20 punkti
<b>Maht m<sup>3</sup></b>	723,10	722,93	712,20	719,59	680,55
<b>Mahu erinevus m<sup>3</sup></b>	-	-0,17	-10,90	-3,51	-42,55
<b>Mahu erinevus %</b>	-	-0,02	-1,51	-0,49	-5,88

Märkus. Erinevused on antud mudel I mahu suhtes.

Skaneerimise andmete põhjal koostatud erineva punktitiheusega mudelite tulemused erinesid õigeks loetud tulemusest kuni 1,51 % ning GNSS meetodil mõõdetud andmete põhjal arvutatud tulemus erines õigeks loetud mahust 5,88 %.

Karude karjääri objekti GNSS meetodi põhjal arvutatud mudeli mahuks on 651,94 m<sup>3</sup>. Karudes kasutati skaneerimise andmete põhjal mudelite koostamiseks kahte punktipilve. Punktipilve A põhjal koostatud mudeli mahuks on 674,75 m<sup>3</sup>. Punktipilve A põhjal arvutatud mahud on välja toodud tabelis 6.

**Tabel 6.** Karude karjääri objekti arvutatud mahud punktipilve A põhjal

	Skaneerimise andmete põhjal mudel I	Skaneerimise andmete põhjal mudel II	Skaneerimise andmete põhjal mudel II	Skaneerimise andmete põhjal mudel IV	GNSS andmete põhjal mudel
<b>Punktitihe</b> <b>m</b>	0,05	0,1	0,3	0,5	100 punkti
<b>Maht m<sup>3</sup></b>	674,75	675,11	675,92	675,47	651,94
<b>Mahu erinevus m<sup>3</sup></b>	-	0,36	1,17	0,72	-22,81
<b>Mahu erinevus %</b>	-	0,05	0,17	0,11	-3,38

Märkus. Erinevused on antud mudel I mahu suhtes.

Karude karjääri objekti puhul erinesid punktipilve A põhjal loodud erineva punktitiheusega mudelite tulemused õigeks loetud mahust kuni 0,17 % ning GNSS meetod erines 3,38 %. Punktipilve B põhjal koostatud mudeli mahuks on 674,94 m<sup>3</sup>. Tabelis 7 on välja toodud Karude karjääri objekti arvutatud mahud punktipilve B põhjal.

**Tabel 7.** Karude karjääri objekti arvutatud mahud punktipilve B põhjal

	Skaneerimise andmete põhjal mudel I	Skaneerimise andmete põhjal mudel II	Skaneerimise andmete põhjal mudel II	Skaneerimise andmete põhjal mudel IV	GNSS andmete põhjal mudel
<b>Punktitihe</b> <b>m</b>	0,05	0,1	0,3	0,5	100 punkti
<b>Maht m<sup>3</sup></b>	674,94	674,59	677,21	678,20	651,94
<b>Mahu erinevus m<sup>3</sup></b>	-	-0,35	2,27	3,26	-23
<b>Mahu erinevus %</b>	-	-0,05	0,34	0,48	-3,41

Märkus. Erinevused on antud mudel I mahu suhtes.

Punktipilve B põhjal tehtud 3D mudelite tulemused erinesid õigeks loetud tulemusest kuni 0,48 % ning GNSS meetodi andmete põhjal arvutatud maht erines kuni 3,41 %.

Karude karjääri objekti punktipilve A ja B põhjal arvutatud mahtude omavaheline erinevus on 0,19 m<sup>3</sup> ja suhteline erinevus väiksema mõõtetulemuse suhtes 0,03 %. Eespool mainitud markseideritöö korra määruse järgi võivad saadud tulemused antud mahtude puhul erineda väiksema mõõtetulemuse suhtes kuni 12 %.

Võttes arvesse, et punktipilve A ja B põhjal koostatud 3D mudelite mahu suhteline erinevus oli väga väike, loeti Karude karjääri objekti õigeks mahuks kõige tihedamate

modelite aritmeetiline keskmine maht, milleks on 674,85 m<sup>3</sup> ja võrreldi neid kahe mudeli aritmeetiliste keskmiste erinevustega, saadud tulemused on välja toodud tabelis 8.

**Tabel 8.** Karude karjääri objekti mudelite aritmeetilised keskmised mahud

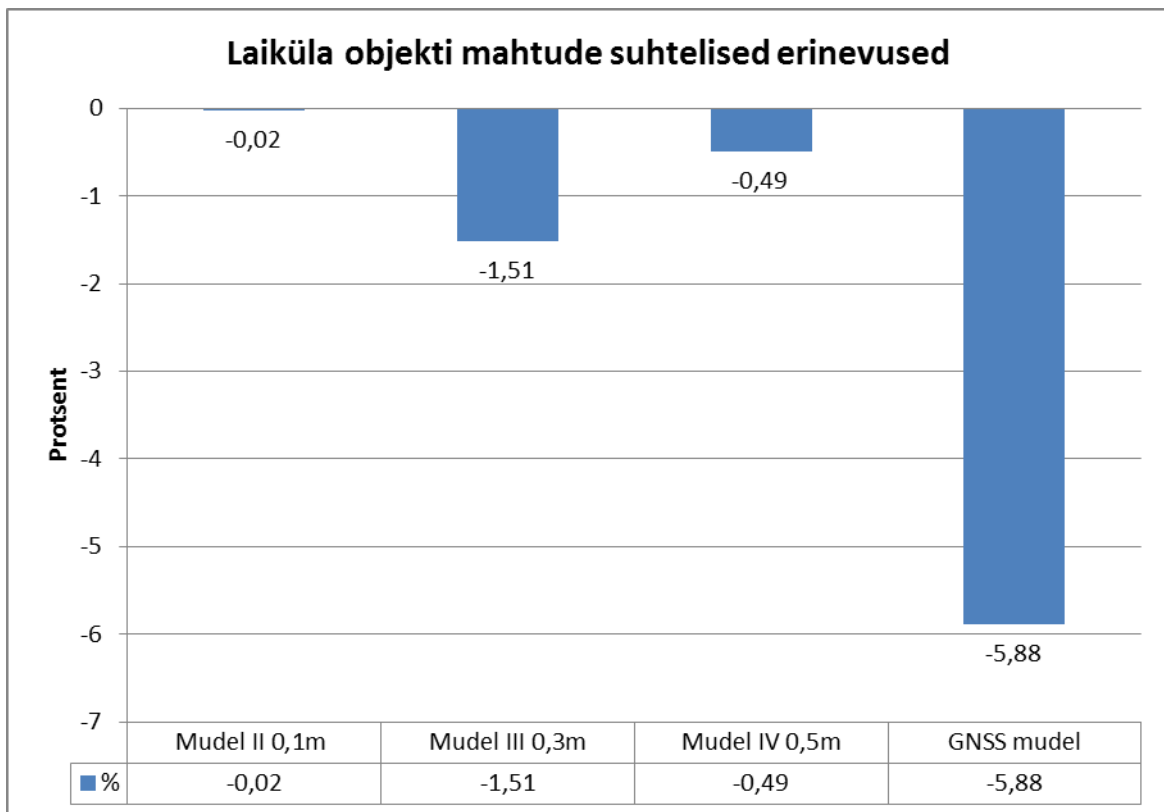
	Skaneerimise andmete põhjal mudel I	Skaneerimise andmete põhjal mudel II	Skaneerimise andmete põhjal mudel II	Skaneerimise andmete põhjal mudel IV	GNSS andmete põhjal mudel
<b>Punktitihedus m</b>	0,05	0,1	0,3	0,5	100 punkti
<b>Keskmine maht m<sup>3</sup></b>	674,85	674,85	676,57	676,84	651,94
<b>Mahu erinevus m<sup>3</sup></b>	-	0	1,72	1,99	-22,91
<b>Mahu erinevus %</b>	-	0	0,25	0,29	-3,39

Märkus. Erinevused on antud mudel I keskmise mahu suhtes.

Punktipilvede A ja B 3D mudelite põhjal arvutatud aritmeetilisest keskmisest mahust erines GNSS meetodi põhjal arvutatud maht 3,39 %, 0,1 m punktitihedusega 3D mudelite keskmine maht erines 0 %, 0,3 m punktitihedusega 3D mudelite keskmine maht erines 0,25 % ja 0,5 m punktitihedusega 3D mudelite keskmine maht erines 0,29 %.

### 3.2 Mahtude arvutamise täpsuse ja töö kiiruse hindamine

Uuritavate objektide mahud on välja toodud eelnevas peatükis. Vaadates **Laiküla turbaraba objekti** puhul arvutatud mahtude erinevust protsentides jooniselt 34, on näha, et GNSS meetodi põhjal arvutatud 3D mudeli mahu suhteline erinevus on õigeaks loetud mahust 5,88 % ja on 42,55 m<sup>3</sup> väiksem.

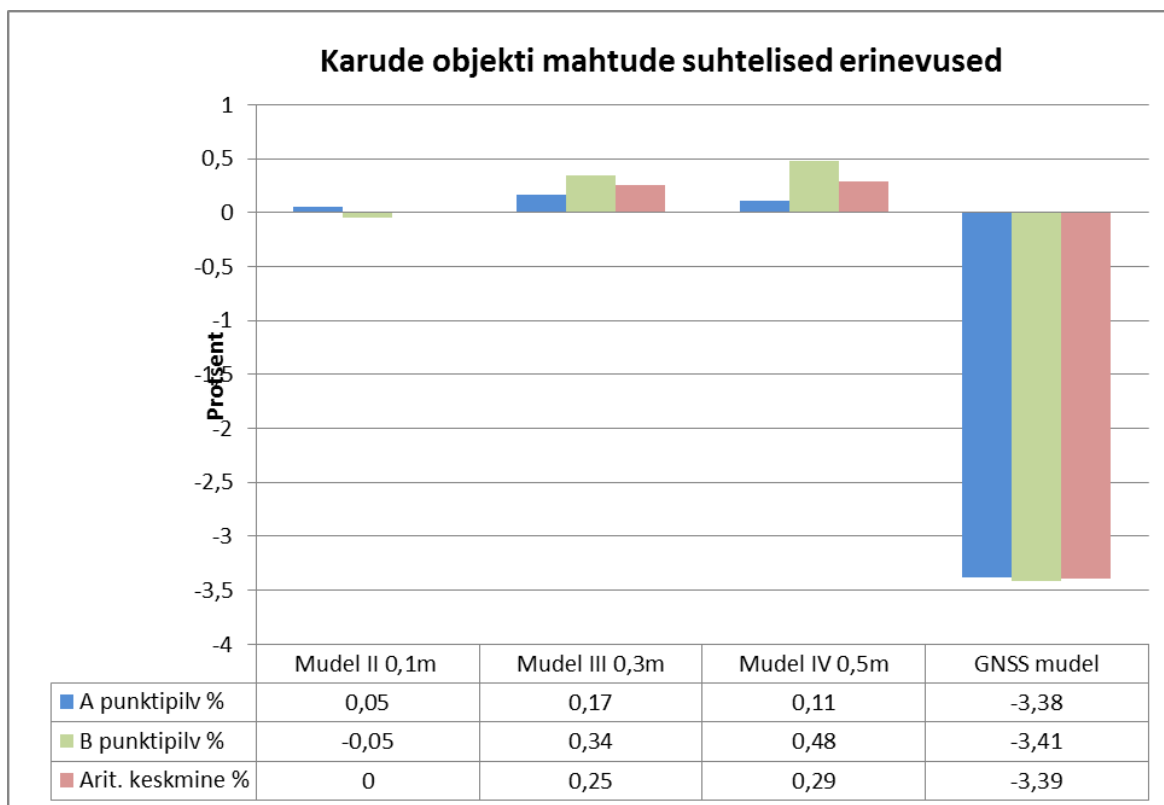


**Joonis 34.** Laiküla objekti mahtude suhteline erinevus protsentides.

Laserskaneerimise andmete põhjal koostatud 3D mudelitel erineb õigeks loetud tulemusest kõige rohkem 0,3 m punktitiheidusega 3D mudeli maht 1,51 % ja on 10,90 m<sup>3</sup> väiksem, järgmisena erineb 0,5 m punktitiheidusega 3D mudeli maht 0,49 % ja on 3,51 m<sup>3</sup> väiksem. 0,1 m punktitiheidusega 3D mudeli maht erineb 0,02 % ja on 0,17 m<sup>3</sup> väiksem.

Antud objekti mahu arvutamisel on kõige väiksem erinevus 0,1 m punktitiheidusega skaneerimise andmete põhjal arvutatud mahul ja kõige suurem erinevus GNSS meetodil mõõdetud andmete põhjal arvutatud mahul.

**Karude karjääri objekti** punktipilvede A ja B ning aritmeetilise keskmise põhjal arvutatud mahtude erinevused on välja toodud joonisel 35.



**Joonis 35.** Karude objekti A ja B punktipilvede ning aritmeetilise keskmise mahtude suhteline erinevus protsentides.

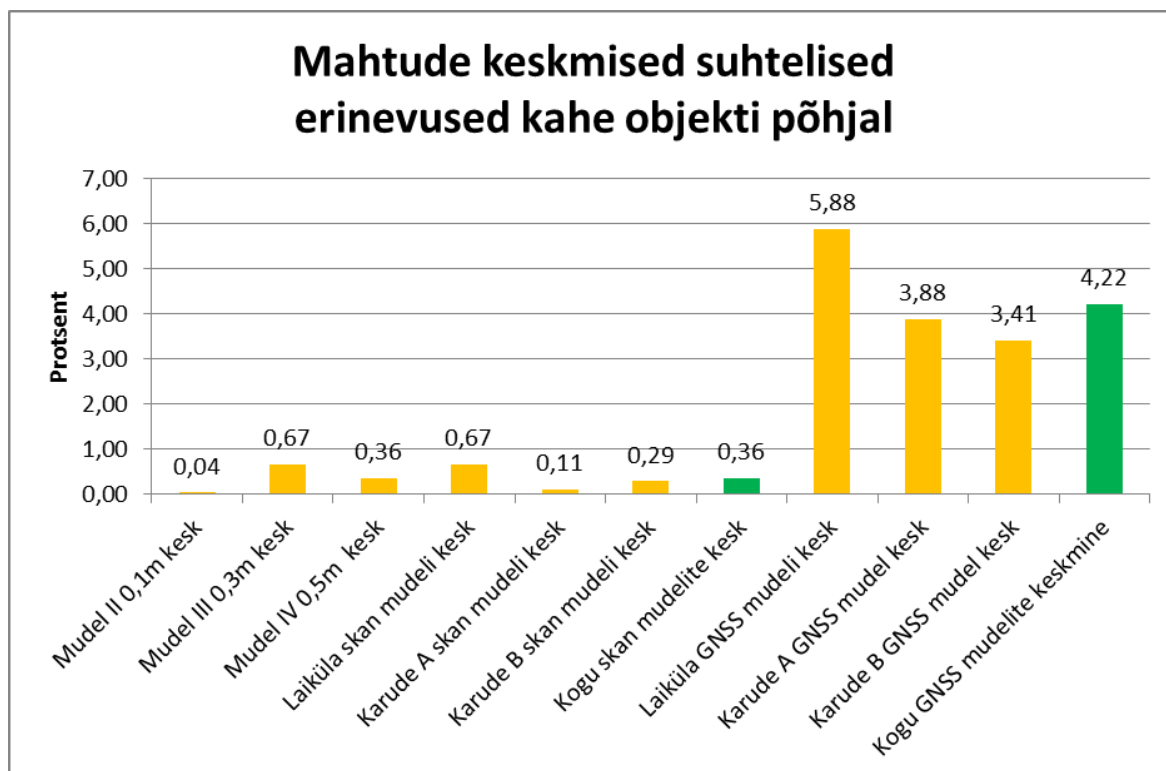
Laserskaneerimise andmete põhjal arvatud maht erineb 0,1 m punktihedusega mudelite aritmeetilisel keskmisel 0 % ja on mahult võrdne aritmeetilise keskmisega. Punktipilve A põhjal erineb 0,1 m punktivahega mudeli maht 0,05 % ja on 0,36 m<sup>3</sup> suurem, 0,1 m punktivahega punktipilve B põhjal koostatud mudeli maht erineb 0,05 % ja on 0,36 m<sup>3</sup> väiksem.

0,3 m punktivahega mudelitel erineb kõige rohkem punktipilve B põhjal koostatud mudeli maht 0,34 % ja 2,27 m<sup>3</sup> suurem, punktipilve A põhjal koostatud mudeli maht erineb 0,17 % ja on 1,17 m<sup>3</sup> suurem. Aritmeetilise keskmise võrdlemisel on 0,3 m punktivahega mudeli mahu erinevus 0,25 % ja on 1,72 m<sup>3</sup> suurem.

0,5 m punktivahedega mudelitel erineb maht B punktipilve põhjal koostatud mudelis 0,48 % ja on 3,26 m<sup>3</sup> suurem, punktipilve A põhjal koostatu mudeli maht erineb 0,11 % ja on 0,72 m<sup>3</sup> suurem. Keskmise võrdlemisel, erineb 0,5 m punktivahega 3D mudeli maht 0,29 % ja on 1,99 m<sup>3</sup> suurem.

GNSS meetodi põhjal arvatud maht erineb punktipilve A 3D mudeli õigeks loetud mahust 3,38 % ja on 22,81 m<sup>3</sup> väiksem, punktipilve B mudeli mahust erineb 3,41 % ja on 23 m<sup>3</sup> väiksem. Keskmiselt erineb GNSS meetod 3,39 % ja on 22,91 m<sup>3</sup> väiksem.

Võrreldes Laiküla turbaraba objekti 3D mudeli mahtu ja Karude karjääri objekti punktipilvede A ja B 3D mudelite mahtude mõõtmisi koos, on joonisel 36 näha mahtude erinevuste absoluutväärtuste keskmised suhtelised erinevused.



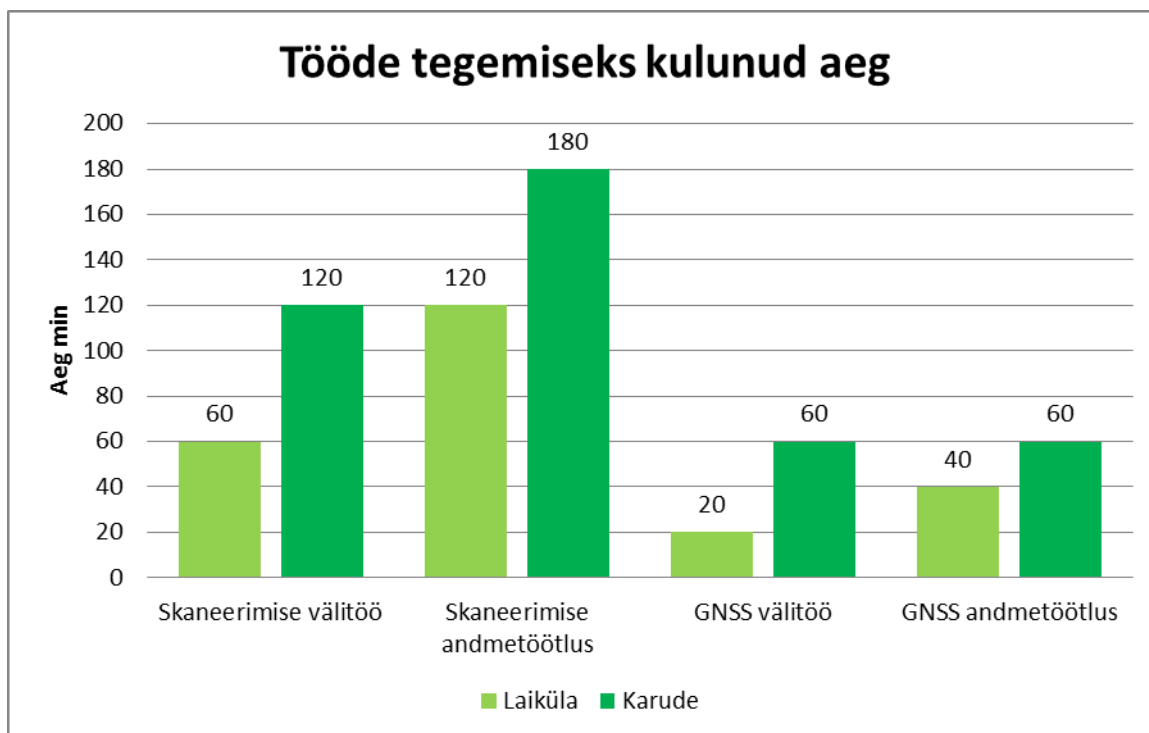
**Joonis 36.** Kahe objekti põhjal arvatud keskmised absoluutväärtuste suhtelised erinevused õigest mahust protsentides.

Skaneerimise andmete põhjal tehtud 0,1 m punktihedusega mudelite mahtude suhteline erinevus oli keskmiselt 0,04 %, 0,3 m punktihedusega mudelite mahtude suhteline erinevus oli keskmiselt 0,67 % ning 0,5 m punktihedusega mudelite mahtude suhteline erinevus keskmiselt 0,36 %. Laiküla turbaraba objekti skaneerimise andmete põhjal tehtud mudelite mahtude keskmine suhteline erinevus oli 0,67 %. Karude karjääri objekti A punktipilve skaneerimise andmete põhjal tehtud mudelite mahtude keskmine suhteline erinevus oli 0,11 %, B punktipilve põhjal 0,29 %.



Kogu skaneerimise andmete põhjal tehtud mudelite mahtude suhteline erinevus oli 0,36 %. GNSS meetodi andmete põhjal arvatatud mahtude suhteline erinevus oli Laiküla objektil 5,88 %, Karude objekti A mudelil 3,88 % ja B mudelil 3,41 %. GNSS meetodi andmete põhjal arvatatud mahtude keskmine suhteline erinevus oli 4,22 %.

**Töö kiiruse hindamiseks** on autor mõlema objekti mahtude arvutamiseks kulunud aja välja toonud joonisel 37.



**Joonis 37.** Tööde tegemiseks kulunud aeg.

Järgnevalt on erinevatele tööosadele kulunud aeg välja toodud üksikasjalikumalt.

**Laserskaneerimisel** võttis mõlema objekti ühes seisupunktis skaneerimine aega 40-50 sekundit, lisaks juurde piltide tegemise aeg, umbes 30 sekundit. Nimetatud aegadele lisanduvad aga ettevalmistustööd, sobivate seisupunktide väljavalimine, vabajaama orienteerimiseks vajalike kindelpunktide mähmäärkimine ja skaneeriva tahhümeetri orienteerimine. Koos ettevalmistusega kulus mõlemal objektil ühe seisupunkti skaneerimiseks 15 minutit, jämeda resolutsiooniga skaneerides saadi selle ajaga 200 000 punkti. GNSS meetodil mõõdistamisega ei ole nii lühikese ajaga nii suurt hulka punkte võimalik mõõta.

**Punktipilve registreerimine** *Trimble Business Centre* tarkvaras võttis umbes 5 minutit. Ühe punktipilve puhastamiseks ebavajalikest punktidest *Autodesk ReCap* tarkvaras kulus umbes 30 minutit kuni tund. *AutoCAD Civil 3D 2019* tarkvaras võttis punktipilvest 3D mudeli tegemine aega olenevalt punktipilve mahust ja arvuti võimsusest 1 minut kuni 15 minutit. Uuritava objekti aluspinna kontuuri digitaliseerimiseks *AutoCAD Civil 3D 2019* tarkvaras kulus olenevalt pinna keerukusest või siledusest umbes 30 minutit. Mahtude arvutamine mudelpinna ja aluspinna võrdlemise teel võttis aega olenevalt arvuti võimsusest minut kuni 5 minutit. Kokkuvõtteks võib öelda, et välitööl kulus ühe objekti laserskaneerimiseks neljast seisupunktist koos ettevalmistusega tund aega. Sisetööl punktipilvede töötlemiseks ja mahu arvutamiseks kulus olenevalt objektist umbes kolm tundi. Kindlasti on kogenud ja vilunud töötaja koostöös võimsa arvutiga võimeline tegema antud tööd kiiremini.

**GNSS meetodil** mahu mõõdistamiseks kulus välitööks Laiküla turbaauna mõõdistamiseks 20 minutit ja Karude karjääri purustatud kruusa kuhila mõõdistamiseks tund aega. Laiküla turbaaunale mõõdeti 20 punkti. Karude karjääris kulus aega rohkem, kuna objekti reljeef oli keerukam ja tuli mõõta rohkem punkte. Karude karjääri mõõdeti objektile tunni ajaga 100 punkti. Mõõdetud punktide *AutoCAD Civil 3D 2019* tarkvarasse importimiseks ja 3D mudeli tegemiseks kulus tund aega. Esialgu oli probleeme GNSS punktidele nime, kõrguse ja koodi kuvamisega *AutoCAD Civil 3D 2019*-s. Kuna antud juhul oli punkte võrreldes skaneeritud mudeliga kõvasti vähem ei mõjutanud arvuti riistvara võimsus andmetöötluseks kuluvat aega. GNSS meetodil kulus välitööl ühe punkti mõõtmiseks olenevalt objektist 30-60 sekundit ja andmetöötluseks 60 minutit. Välitööks kuluvat aega mõjutab mõõdetavate punktide arv ja mõõdetava objekti reljeef ning see kui kiirelt objektil ühelt punktilt teisele liikuda õnnestub.

### 3.3 Arutelu

Töö metoodika puhul lähtuti eelnevalt kirjeldatud Hamzah ja Saidi poolt Malaysia Tehnikaülikoolis 2011. aastal tehtud uurimistööst puistangu mahu mõõtmisel, kus loeti õigeks mahuks laserskaneerimise andmete põhjal tiheda punktivahega koostatud 3D mudel

ning võrreldi seda hõredamate mudelitega ja teiste mõõtmismeetoditega kogutud andmete põhjal koostatud mudeliga.

Antud uurimistöös loeti õigeks tulemuseks staatilise laserskaneerimise andmete põhjal koostatud 0,05 m punktivahega mudelid, neid võrreldi 0,1 m, 0,3 m, 0,5 m punktitiheidusega mudelitega ning GNSS meetodiga kogutud andmete põhjal koostatud mudelitega. Andmetöötluses arvutati ka hõredama punktitiheidusega laserskaneerimise andmete põhjal mahtu, kuid tulemused erinesid ligi 50 % ja neid ei lisatud antud uurimistöösse.

Uurimistöö Laiküla turbaraba objektil tuli 0,1 m punktitiheidusega arvutatud 3D mudeli mahu suhteline erinevus õigeks loetud mahuga 0,02 % ja 0,17 m<sup>3</sup> väiksem. Karude karjääri objekti punktipilve A põhjal koostatud 0,1 m punktitiheidusega 3D mudeli mahu suhteline erinevus õigeks loetud mahust on 0,05 % ja on 0,36 m<sup>3</sup> suurem, punktipilve B põhjal koostatud 0,1 m punktitiheidusega 3D mudeli maht erines 0,05 % ja on 0,35 m<sup>3</sup> väiksem. Arvutades Karude karjääri objekti kahe 3D mudeli aritmeetilised keskmised, erinesid need 0,1 m punktitiheidusega mudeli puhul 0 %.

Võrreldes õigeks loetud mahte GNSS meetodil kogutud andmete põhjal arvutatud mahuga, erines Laiküla turbaraba objekti maht 5,88 % ja on 42,55 m<sup>3</sup> väiksem. Karude objektil erines GNSS meetodi abil arvutatud maht punktipilve A põhjal tehtud 3D mudeli mahust 3,38 %, olles 22,81 m<sup>3</sup> väiksem. Punktipilve B põhjal tehtud 3D mudeli mahust erines GNSS meetodil kogutud andmete maht 3,41 %, olles 23 m<sup>3</sup> väiksem ja kahe punktipilve põhjal koostatud 3D mudelite aritmeetilisest keskmisest mahust erines GNSS meetodil arvutatud maht 3,39 %, olles 22,91 m<sup>3</sup> väiksem. Laiküla turbaraba objektist koostati mudel GNSS meetodil kasutades 20 punkti ning Karude karjääri objektist mudeli koostamisel kasutati 100 punkti. Karude karjääri objektil mõõdeti rohkem GNSS punkte kuna reljeef oli keerulisem. Samas on Karude objekti puhul võrreldes Laikülaga GNSS meetodi andmete põhjal arvutatud mahu erinevus väiksem. Sellest võib järeldada, et mida üksikasjalikumalt on uuritava objekti reljeef mõõdetud seda täpsemalt saab arvutada selle mahu.

Võrreldes omavahel erineva tihedusega laserskaneerimise andmete põhjal koostatud 3D mudelite mahtu, on hõredamad mudelid õigeks loetud mahust järjest suurema erinevusega. Laiküla objekti puhul tuli 0,5 m punktivahega parem tulemus kui 0,3 m punktivahega.

Antud juhul võib põhjuseks olla uuritava objekti tipu mudeldamise kehvem täpsus 0,3m punktivahega mudelis, kuna seal on TIN meetodil loodud kolmnurkade võrk hõredam, võrreldes 0,5 m punktivahega mudeliga, mudelid on näidatud lisades 3 ja 4.

Mahtude aritmeetiline keskmine suhteline erinevus õigeks loetud mahust kahe objekti põhjal on GNSS meetodi andmetel 4,22 %, 0,3 m punktihedusega skaneerimise andmetel 0,67 %, 0,5 m punktihedusega skaneerimise andmete põhjal 0,36 % ja 0,1 m punktihedusega skaneerimise andmete põhjal 0,04 %. Kogu skaneerimise andmete põhjal arvutatud mahtude keskmine suhteline erinevus on 0,36 %.

Uurimistöös kasutatud meetodite ajakulu võrreldes järeltas autor, et staatilisel laserskaneerimisel kulub välitööga võrreldes hilisemale andmetöötlusele rohkem aega. Samas saab laserskaneerimisel võrreldes tavapärase GNSS või tahhümeetrilise mõõdistamisega sama ajaga korda rohkem andmeid. Ühe seisupunkti skaneerimiseks kulus koos ettevalmistusega töö autori 15 minutit ning selle ajaga mõõdeti ca 200 000 punkti. Hilisem andmetöötlus nõuab suure andmehulga tõttu suure jõudlusega arvutit. GNSS meetodil kulus välitööl ühe punkti mõõtmiseks olenevalt objektist 30-60 sekundit ja andmetöötluseks 60 minutit. GNSS meetodi puhul mahtude arvutamine ei vaja nii suure jõudlusega arvutit, kuna seal on vähem mõõdetud punkte ja andmed ei ole nii mahukad.

Laserskaneerimisel on autori arvates eelis turbarabades mõõdistamisel, sest antud meetodi kasutamisel ei pea objektile peal kõndima. Pluss-kraadidel on turvas väga pehme ja mõõdistajal on seal väga raske liikuda, laserskaneerimisel on võimalik objekt mõõdistada distantilt.

Autor järeltas uurimistöö tulemuste põhjal, et töö alguses püstitatud hüpotees, et staatilisel laserskaneerimisel on võrreldes GNSS meetodiga mahtude arvutamiseks vajalikel mõõtmistel suurem täpsus ja seda võiks kasutada alternatiivina traditsioonilisele mõõdistamisele. Samas jäävad GNSS mõõtmised oma täpsusega markseideritööde lubatud 12 % suhtelise erinevuse piiridesse.

## KOKKUVÕTE

Staatilist laserskaneerimist on Eestis ja mujal maailmas hakatud järjest rohkem kasutama, kuna seadmed on muutunud varasemaga soodsamaks ning mitmekülgsemaks. Tänapäeval on tootjad hakanud pakkuma ka skaneerivaid elektrontahhümeetreid, mis on oma olemuselt universaalsemad ja millel on laiem kasutusvaldkond ning mis pakuvad klassikalistele laserskanneritele konkurentsi.

Antud magistritöö eesmärgiks on uurida puistangu mahtude määramise täpsust staatilise laserskaneerimise andmete põhjal. Uurimistöös püstitati kaks hüpoteesi. Esimeseks hüpoteesiks on staatilise laserskaneerimise suurem täpsus mahtude arvutamisel võrreldes GNSS meetodiga. Teiseks hüpoteesiks on, et traditsiooniline GNSS ja tahhümeetrilise mõõdistamine on mahtude mõõdistamiseks liiga aeganõudev. Staatiline laserskaneerimine võiks olla nendele meetoditele alternatiiviks. Töös võrreldi omavahel GNSS meetodiga mõõdistatud andmete põhjal arvutatud mahtu staatilise laserskaneerimise andmete põhjal arvutatud mahuga. Mõõtmised viidi läbi kahel objektil, Laiküla turbarabas ja Karude karjääris. Uurimistöö GNSS mõõtmisteks kasutati Trimble R4 GNSS seadet koos TSC-3 väliarvutiga ning staatiliseks laserskaneerimiseks kasutati skaneerivat elektrontahhümeetrit Trimble SX10. Andmete töötlemiseks kasutati *Trimble Business Centre* tarkvara, *Autodesk ReCap* tarkvara, *Autodesk AutoCAD Civil 3D 2019* tarkvara ning *Microsoft Excel* tarkvara. Uurimistöös koostati laserskaneerimise andmete põhjal 3D mudelid 0,05 m, 0,1 m, 0,3 m ja 0,5 m punktitiheidusega.

Objektide mahtude arvutamisel võrreldi erinevate 3D mudelite mahte õigeks loetud mahuga, milleks on 0,05 m punktitiheidusega 3D mudeli põhjal arvutatud maht. Mahtude keskmine suhteline erinevus kahe objekti põhjal on GNSS andmete põhjal 4,22 %. Järgnevalt erines õigeks loetud tulemusest 0,3 m punktitiheidusega mudeli arvutatud maht, 0,67 %, 0,5 m punktitiheidusega mudeli mahti erines 0,36 % ja 0,1 m punktitiheidusega mudeli maht erines 0,04 %. Kogu skaneerimise andmete põhjal arvutatud mahtude keskmine suhteline erinevus on 0,36 %.

Töö tulemuste põhjal saab järeldada, et kõik uuritud meetodid jäävad oma erinevusega markšeideritööde lubatud 12 % suhtelise erinevuse piiridesse. Kahe objekti keskmine suhteline erinevus laserskaneerimise andmete põhjal loodud 3D mudelite mahtude arvutamisel oli 0,36 % ning GNSS andmete põhjal loodud 3D mudelite keskmine suhteline erinevus 4,22 %, seega võib järeldada, et staatiline laserskaneerimine on GNSS meetodil mahtude mõõdistamisest suurema täpsusega.

GNSS mõõtmistel tuli Karude karjääri objekti mahu arvutamisel erinevus võrreldes õigeks loetud tulemusega väiksem kui Laiküla objektil. Karude karjääris mõõdeti GNSS meetodil rohkem punkte, sellest võib järeldada, et GNSS meetodil mõõdetud mahtude arvutamise täpsust saab suurendada, mõõtes objektile rohkem punkte.

Mahtude täpsuse poolest saab uuritud meetoditest täpseimaks hinnata staatilist laserskaneerimise andmete põhjal koostatud mudelit 0,1 m punktivahega.

Töö kiiruse hindamiseks võrreldi omavahel GNSS meetodi välitööks ja sisetööks kulunud aega ning staatilise laserskaneerimise välitööks ja sisetööks kulunud aega. Antud uurimistöös kulus staatilisel laserskaneerimisel välitööl ühes seisupunktis skaneerimiseks koos ettevalmistusega aega 15 minutit, millega skaneeriti ca 200 000 punkti. GNSS meetodil ei ole võimalik nii lühikese ajaga nii suurt hulka punkte mõõta. Skaneerimise sisetööks kulus Laiküla turbaraba objekti puhul mudelite tegemiseks 120 minutit ja Karude karjääri objektil 180 minutit. Karude objektil kulus kauem aega, kuna seal tehti topelt arv mudeleid. Laserskaneerimisel on töö autori arvates negatiivne külg selles, et andmete maht on väga suur ja seetõttu on andmetöötluseks vaja suure jõudlusega arvutit.

Uurimistöö tulemuste põhjal järeldati, et staatiline laserskaneerimine on mahtude arvutamiseks vajalikul mõõdistamisel töö kiiruselt traditsioonilistele GNSS ja tahhümeetrilisele mõõdistamisele sobivaks alternatiiviks.

Laserskaneerimisel on eelis tavapäraste mõõtmismeetodite ees, kuna skaneerimisel mõõdistatakse uuritavale objektile tihe punktipilv, kus on olenevalt kasutatavast aparaadist ja valitud resolutsioonist tuhandeid kuni miljoneid punkte. Lisaks on keeruka kujuga objekti puhul keeruline ja ajamahukas GNSS meetodil või tahhümeetrilisel mõõdistusel kõike üksikasjalikult üles mõõdistada.

## KASUTATUD KIRJANDUS

- Alonso, S. J. J. I., Rubio, M. J., Martin, F. J. J., Fernandez, G. J.** (2011). Comparing time-of-flight and phase-shift. The survey of the royal pantheon in the basilica of San Isidoro (Leon). - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Nr. 38. [e-ajakiri] <http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XXXVIII-5-W16/377/2011/isprsarchives-XXXVIII-5-W16-377-2011.pdf> (2.05.2018)
- Berg-Jürgens, J.** (2015) Erinevate meetoditega loodud ortofotomosaiikide täpsus mehitama lennuki MUST Q aerofotode näitel. (Magistritöö). Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu
- Colombo, L., Marana, B.** (2010) Terrestrial laser scanning: how it works and what it does. GIM Int 24(12):17–20 [e-ajakiri] <https://www.gim-international.com/content/article/terrestrial-laser-scanning-2> (13.03.2018)
- Datasheet - Trimble R4 GNSS - English <https://community.trimble.com/docs/DOC-1243> (13.05.2018)
- Du, J., Teng, H.** (2007) 3D laser scanning and GPS technology for landslide earthwork volume estimation. Automation in Construction 16 (2007) 657– 663
- Geoimage. (2018) [WWW] <http://www.geoimage.com.au/DEMS/dems-overview> (17.04.2018)
- Hamzah, B., H., Said, M., S.** (2011) Measuring volume of stockpile using Imaging station. Geoinformation Science Journal, Vol. 11, No. 1, 2011, pp: 15-32
- Hu, C., Zhou, Y., Zhao, C., Pan, Z.** (2015) Slope excavation quality assesment and excavated volume calculation in hydraulic projects based on laser scanning technology. Water Science and Engineering 2015, 8(2): 164-173
- Jürgenson, H.** (2011) Elektrontahhümeetria. (Loengumaterjalid). Eesti Maaülikool, Geomaatika osakond. Tartu
- Kirs, E.** (2017) Eesti RTK GNSS võrkude täpsuse hindamine. (Bakalaureusetöö). Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu
- Kolõganova, A.** (2014) Pinnasetööde mahuarvutused erinevate GIS tarkvarapakettidega Kohtla-Järve poolkoki ladestu sulgemistöde näitel. (Magistritöö). Tallinna Tehnikaülikooli teedeinstituut. Tallinn.

- Lachat, E., Landes, T., Grussenmeyer, P.** (2017) Investigation of a Combined Surveying and Scanning Device: The Trimble SX10 Scanning Total Station. *Sensors – Open Access Journal*. Sensors (Basel). 2017 Mar 31;17(4). pii: E730. doi: 10.3390/s17040730.
- Li, Z., Zhu, Q., Gold, C.** (2005) Digital terrain modeling: principles and methodology. CRC press.
- Maa-ameti geoportaal (2018) [WWW] <http://geoportaal.maaamet.ee> (11.04.2018)
- Männamets, H.** (2015) Droonilt mõõdistamise kasutamise võimalikkus markšeideritöödel. (Magistritöö). Tallinna Tehnikaülikoolis mäeinstituut. Tallinn
- Pflipsen, B.** (2006). VOLUME COMPUTATION - a comparison of total station versus laser skanner and different software. (Magistritöö). University of Gävle. Gävle
- Quintero, M. S., Genechten, B. V., Bruyne, M. D., Poelman, R., Hankar, M., Barnes, S., Caner, H., Craven, P., Budei, L., Heine, E., Reiner, H., García, J. L. L. Tarongel, J. M. B.** (2008). Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning. – Training material based on practical applications. Version 4. 241 lk.
- Reshetyuk, Y.** (2009). Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning. (Dokoritöö). Royal Institute of Technology. Stockholm
- Riigi Teataja (2018) Markšeideritöö kord (Vastuvõetud 23.01.2012) Elektrooniline Riigi Teataja [WWW] <https://www.riigiteataja.ee/akt/125012012004>
- Rüdja, A., Sander, J.** (2013). Globaalne asukohamääramine. Tallinn: SA INNOVE. 279 lk. [WWW] <http://haridusinfo.innove.ee/UserFiles/Kutseharidus/%C3%95ppekava/GNSS%20m%C3%B5%C3%B5tmised%206.pdf> (01.05.2018)
- Siebert, S., Teizer, J.** (2014) Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system. *Automation in Construction* 41 (2014) 1–14
- Zapalkova, P., Smitka, V., Mikolas, M.** (2011). Comparison of tacheometry and laser scanning methods for measuring the quarry in Jakubcovice nad Odrou. *GeoScience Engineering*, Volume LVII (2011), No.3, p. 73-88, ISSN 1802-5420. [e-ajakiri] <http://gse.vsb.cz>
- Trimble SX10 spetsifikatsioon [WWW] <http://www.geosoft.ee/tooted/trimble-sx10> (10.05.2018)
- Trimble R4. Prin.ru. [WWW] [http://www.prin.ru/images/old\\_site/trimble\\_r4\\_tsc2.jpg](http://www.prin.ru/images/old_site/trimble_r4_tsc2.jpg) (10.05.2018)
- Uueküla, K.** (2014). Terrestilise laserskaneerimise andmete baasil loodud 3D mudelite kvaliteedi analüüs. (Magistritöö). Tallinna Tehnikaülikooli teedeinstituut. Tallinn.
- What is GNSS. (2018). – European Global Navigation Satellite Systems Agency. [WWW] <https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/what-gnss> (03.05.2018)
- Wikipedia. (2018) [WWW] [https://en.wikipedia.org/wiki/Delaunay\\_triangulation#/media/File:Delaunay\\_circumcircles\\_centers.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Delaunay_triangulation#/media/File:Delaunay_circumcircles_centers.svg) (23.04.2018)



# **ACCURACY OF STOCKPILE VOLUME CALCULATIONS BASED ON STATIC LASER SCANNING DATA**

## **Summary**

Static laser scanning has started to be used more and more in Estonia and in the rest of world, as the equipment has become more affordable and versatile. Today manufacturers have begun to offer scanning total stations, which are more universal and have a wider range of applications and which offer competition to classical lasers scanners.

Masters's thesis aim is to research the accuracy of stockpile volume calculations based on static laser scanning data. Two hypotheses were set out in research. The first hypothesis is the higher precision of static laser scanning when calculating stockpile volumes, compared to the GNSS method. Another hypothesis is that traditional GNSS and tachymetric surveys are too time consuming to measure stockpile volumes. Static laser scanning could be an alternative to these methods. Thesis compared the volume calculated on the basis of data measured by the GNSS method and on the basis of static lasers scanning data. Measurements were made on two objects, in Laiküla peat bog and Karude quarry. For the GNSS measurements Trimble R4 GNSS device was used with the TSC-3 controller, Trimble SX10 scanning total station was used for static laser scanning. Data was processed using Trimble Business Centre software, Autodesk AutoCAD Civil 3D 2019 software and Microsoft Excel software. 3D models with 0,05 m, 0,1 m, 0,3 m and 0,5 m point density were created.

Calculating the volumes of objects, the volumes of different 3D models were compared to the correct volume, which is the volume calculated on the basis of a 0,05 m point density model. The average relative difference of volume, based on two objects in GNSS data is 4,22 %. Subsequently, the calculated volume difference in the 0,3 m point density model was 0,67 % different, 0,5 m point density model was 0,36 % different and the 0,1 m point density model was 0,04 % different. The relative average difference of volumes, based on laser scanning data is 0,36 %.

Based on the results of the thesis, it can be concluded that all the researched methods remain within the limits of the relative 12 % permissible difference. The average difference of volume, based on two objects was 0,36 % based on static laser scanning data and 4,22 % based on GNSS data. It can be concluded, that static laser scanning is more accurate than GNSS method for calculating volumes. In terms of precisions of the calculated volume, the most accurate method is calculating the volume using 0,1 m point density model.

To evaluate the speed of work, the time spent on field work and office work were compared on both methods. In field work, one setup point and scanning with the static laser scanner with preparation time took 15 minutes, which scanned about 200 000 points. The GNSS method does not allow such a large number of points to be measured in such a short time. Laser scanning data processing, modeling and volume calculation took 120 minutes for Laiküla peat bog object and 180 minutes for Karude quarry object. Karude quarry object data processing took more time because there were two times more models. The autor believes that the downside of laser scanning is the big volume of data and because of that data processing requires a high performance computer. The GNSS method, field work required one point to measure 30-60 seconds depending of the object and 60 minutes for data processing.

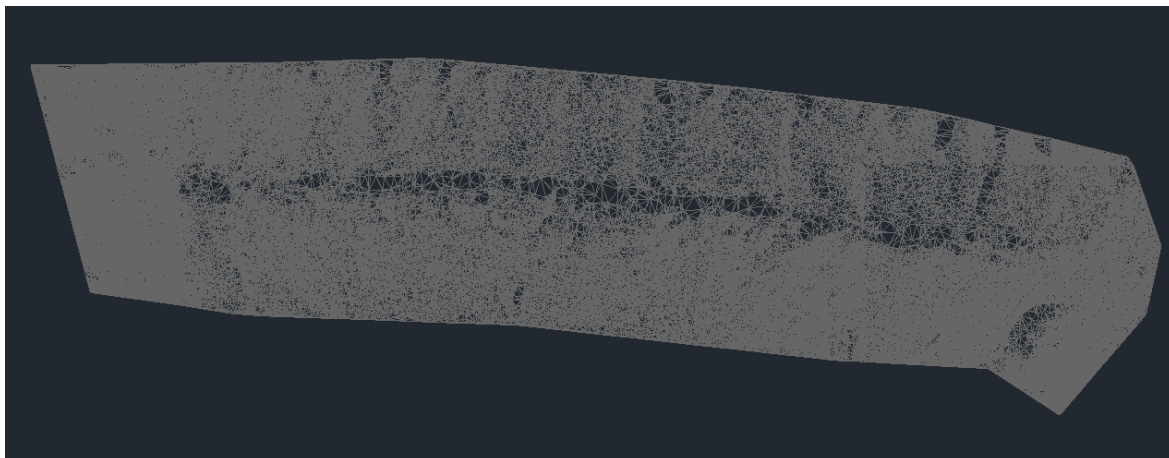
GNSS measurements were more accurate in the Karude quarry object compared to the Laiküla peat bog object. In Karude quarry more points were measured using the GNSS method, which suggests that the accuracy of the calculated volume based on GNSS method can be increased by measuring more points on the object.

Based on the results of this masters's thesis, it was concluded that static laser scanning is an appropriate alternative for measuring volumes to traditional GNSS and tachymetric surveying.

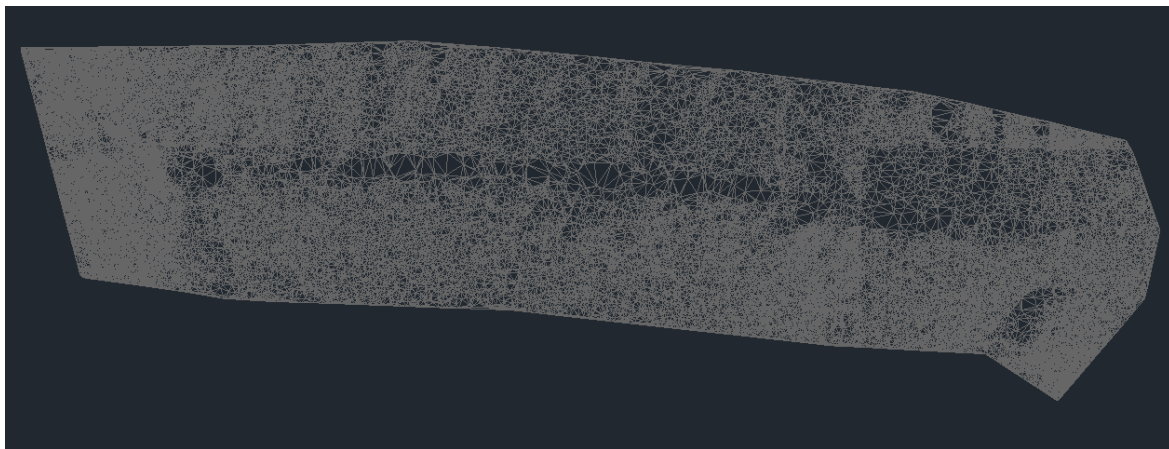
Lasers scanning has an advantage over conventional measurement methods, because laser scanner measures a dense point cloud of the object containig thousands to millions of points, depending of selected resolution and used device. Additionally, it is very time consuming to measure complicated objects using traditional GNSS and tahymetric survey.

**LISAD**

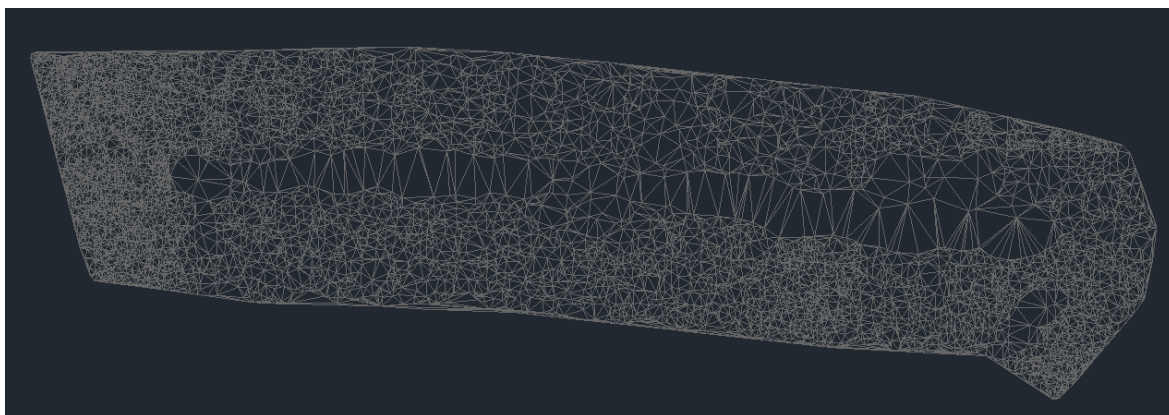
**Lisa 1. Laiküla turbaraba objekti 3D mudel pealtvaates 0,05 m punktitihedusega**



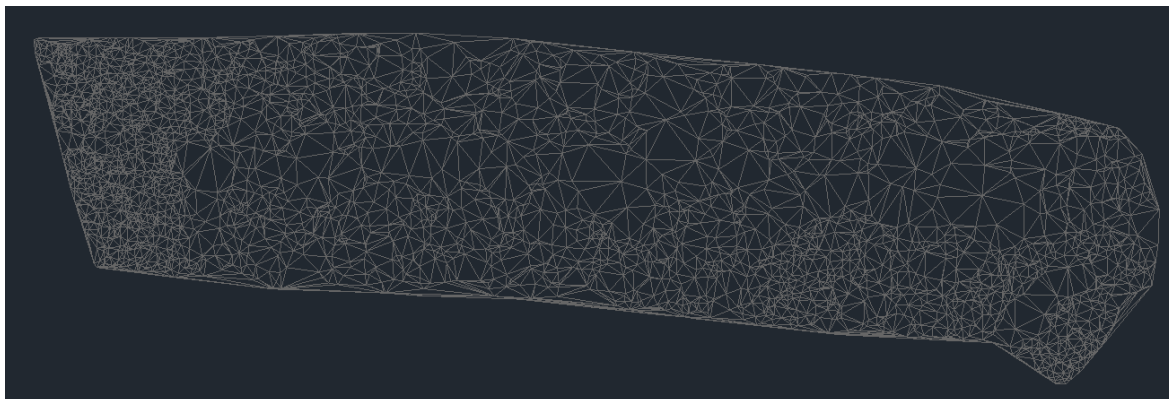
**Lisa 2. Laiküla turbaraba objekti 3D mudel pealtvaates 0,1 m punktitihedusega**



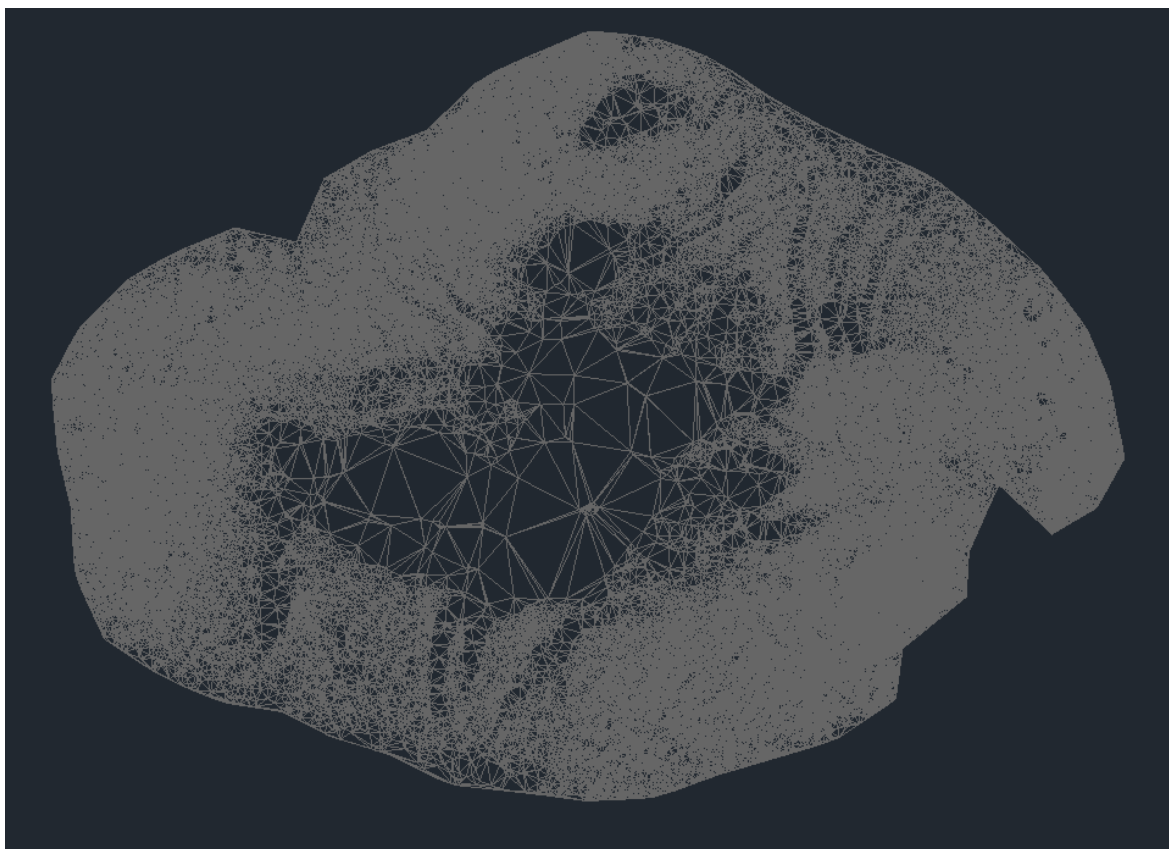
**Lisa 3. Laiküla turbaraba objekti 3D mudel pealtvaates 0,3 m punktitihedusega**



**Lisa 4. Laiküla turbaraba objekti 3D mudel pealtvaates 0,5 m punktitihedusega**

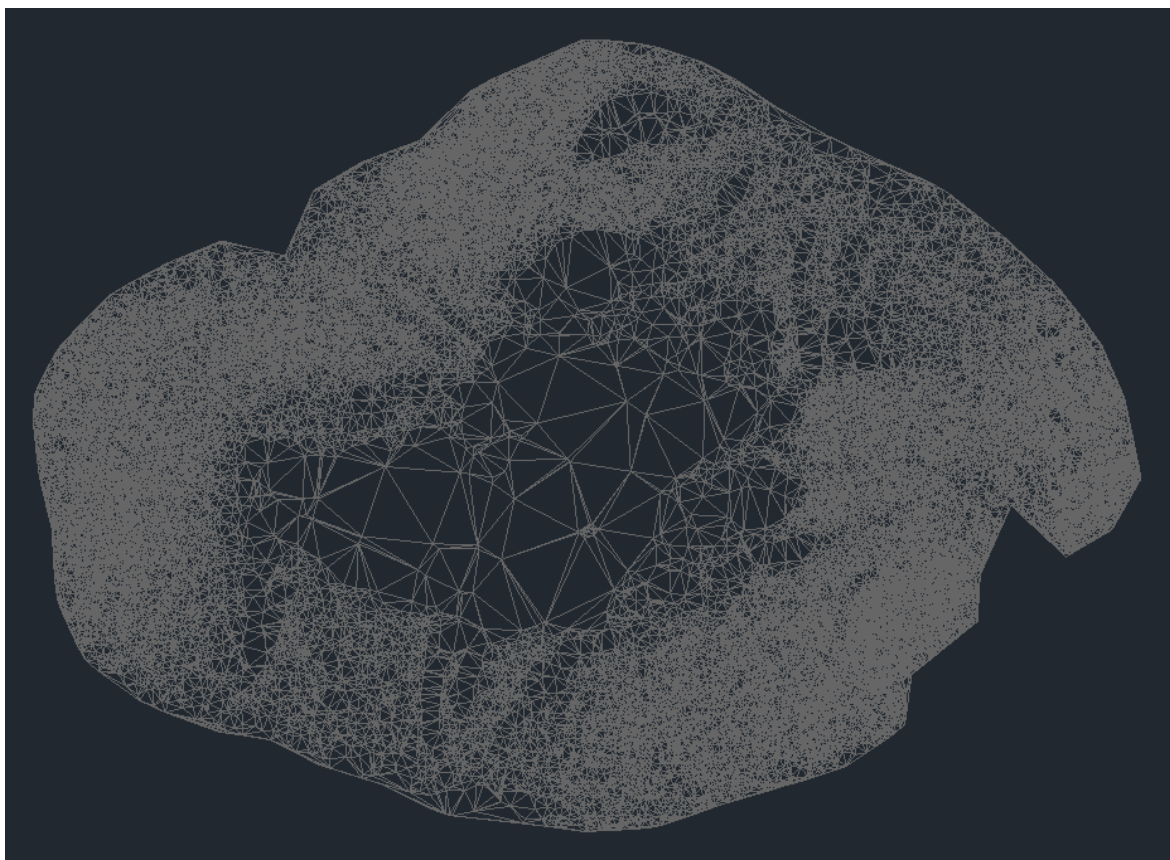


**Lisa 5. Karude karjääri objekti punktipilve A põhjal loodud 3D mudel  
pealtvaates 0,05 m punktivahega**

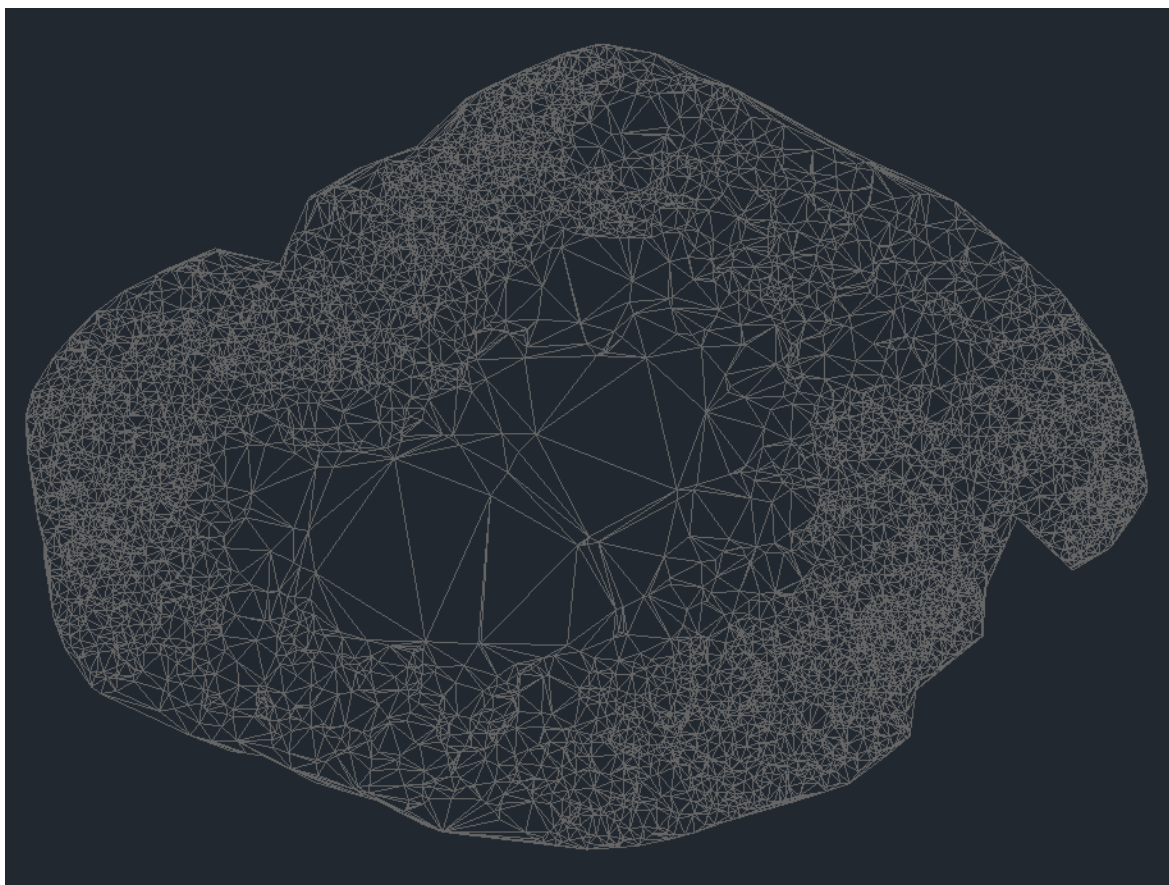




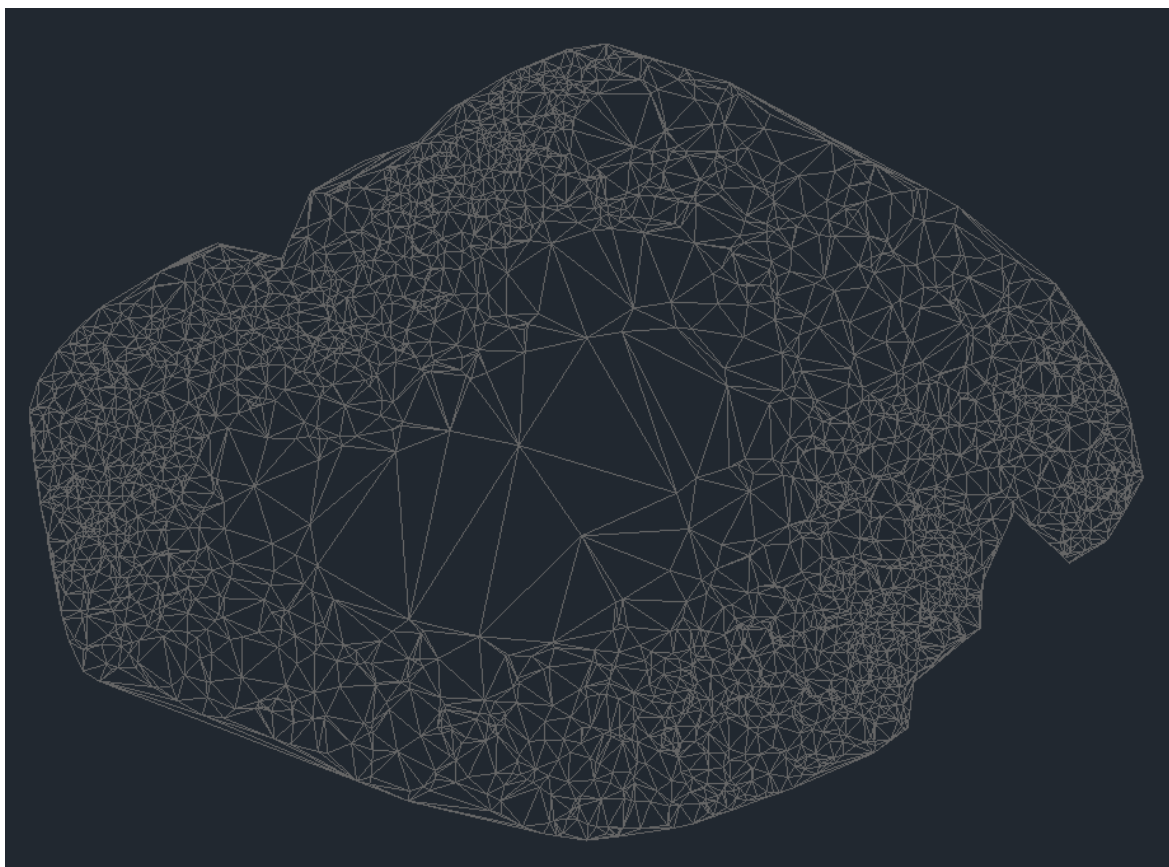
**Lisa 6. Karude karjääri objekti punktipilve A põhjal loodud 3D mudel  
pealtvaates 0,1 m punktivahega**



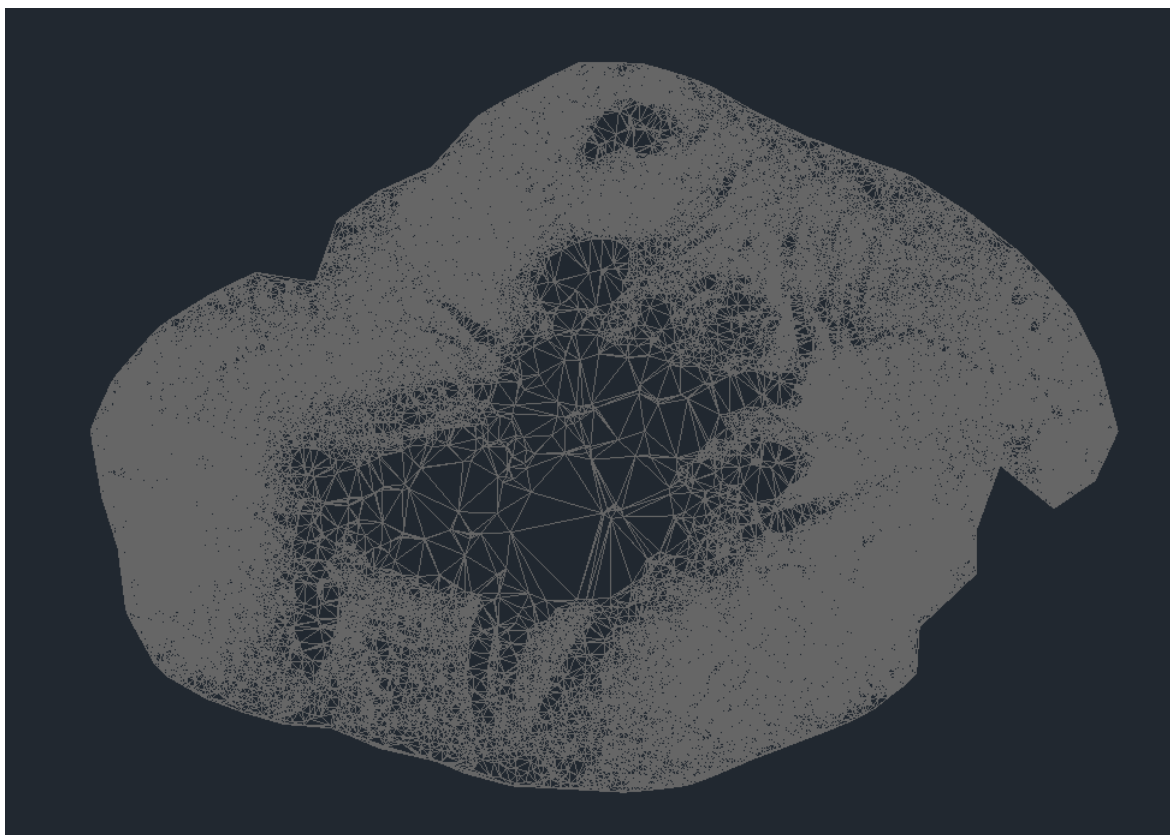
**Lisa 7. Karude karjääri objekti punktipilve A põhjal loodud 3D mudel  
pealtvaates 0,3 m punktivahega**



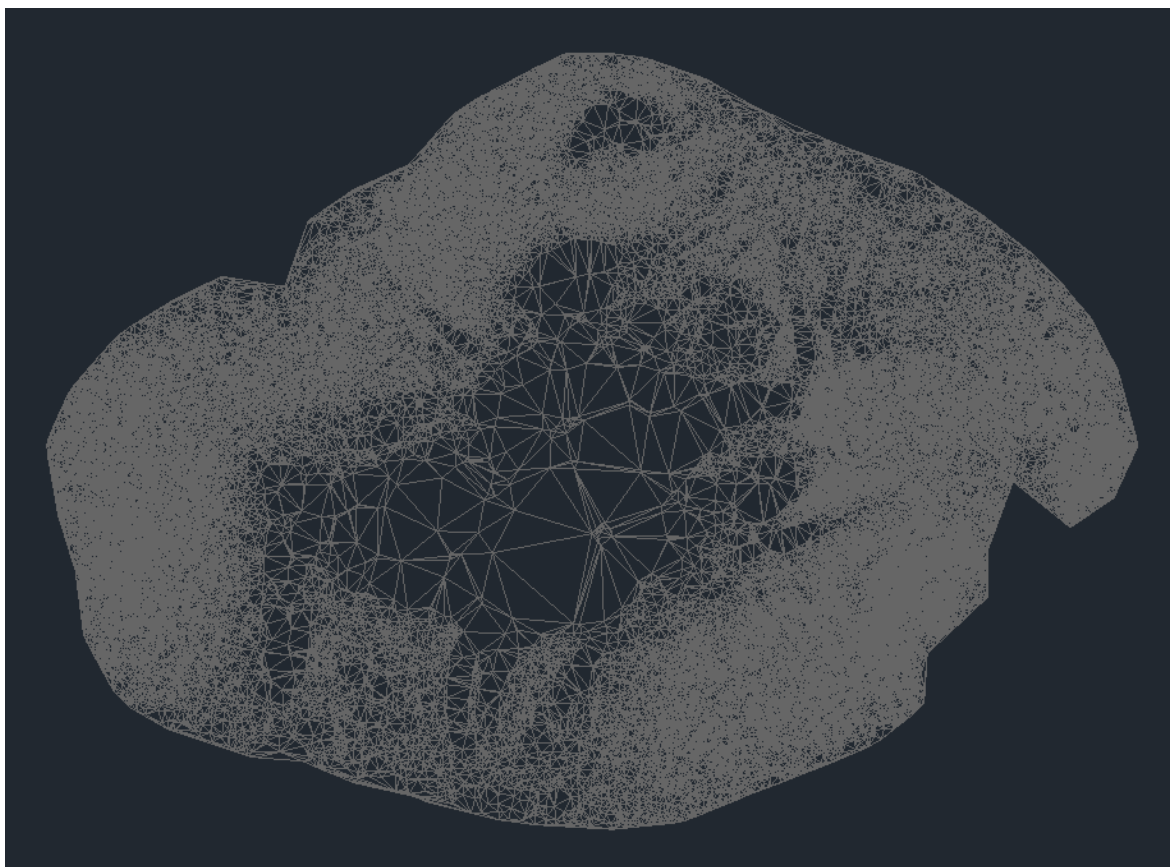
**Lisa 8. Karude karjääri objekti punktipilve A põhjal loodud 3D mudel  
pealtvaates 0,5 m punktivahega**



**Lisa 9. Karude karjääri objekti punktipilve B põhjal loodud 3D mudel  
pealtvaates 0,05 m punktivahega**

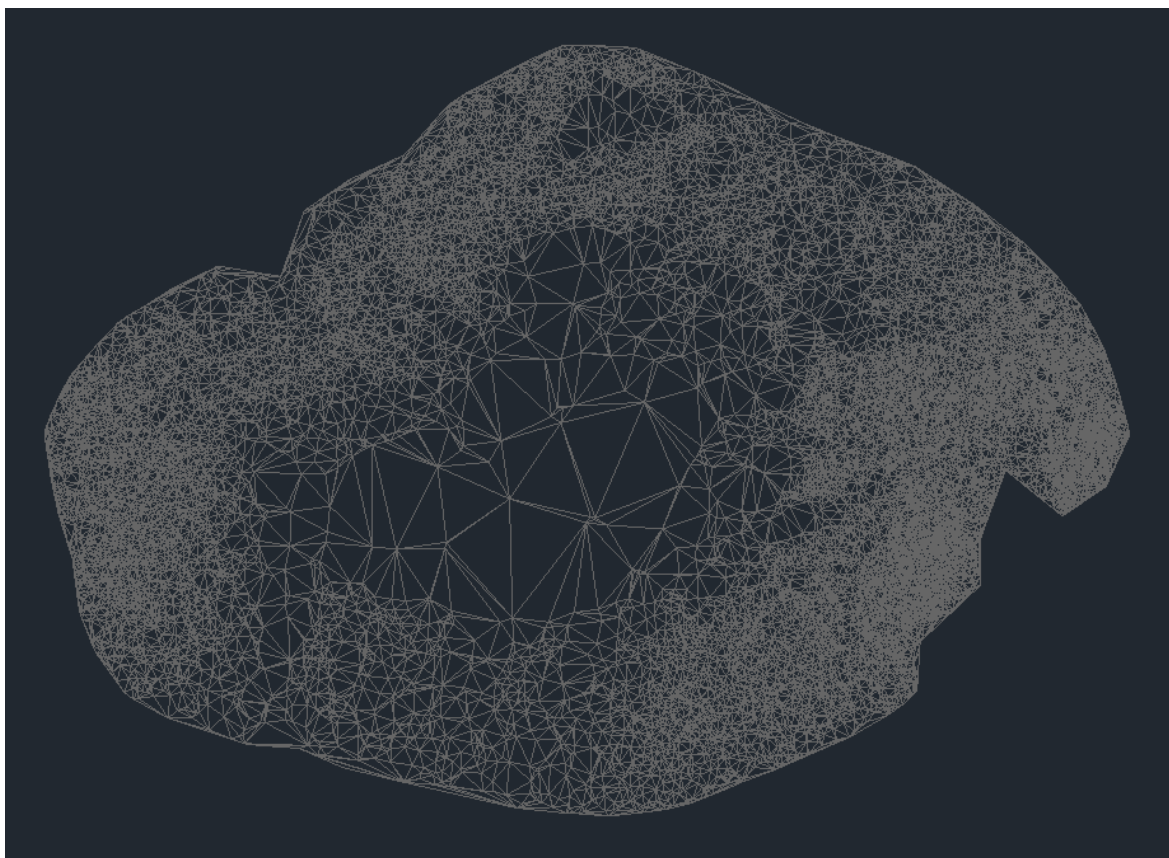


**Lisa 10. Karude karjääri objekti punktipilve B põhjal loodud 3D mudel  
pealtvaates 0,1 m punktivahega**

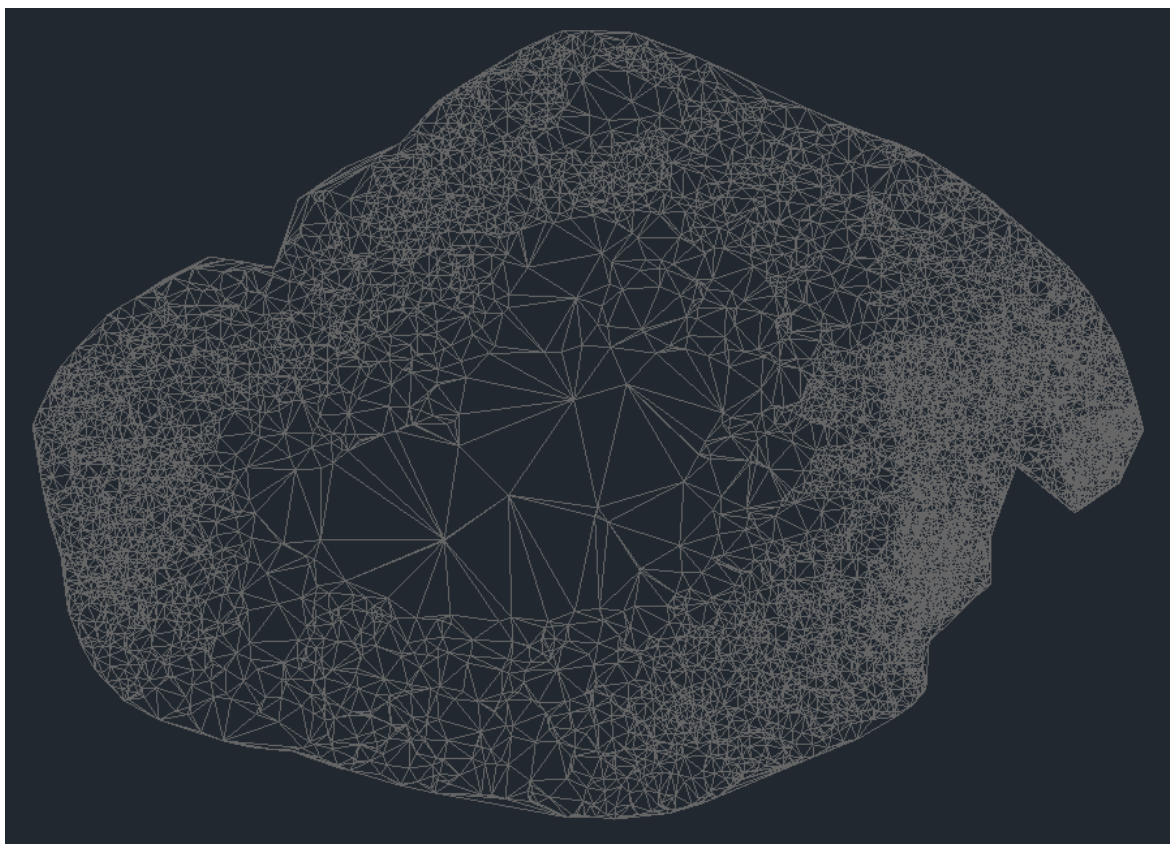




**Lisa 11. Karude karjääri objekti punktipilve B põhjal loodud 3D mudel  
pealtvaates 0,3 m punktivahega**



**Lisa 12. Karude karjääri objekti punktipilve B põhjal loodud 3D mudel  
pealtvaates 0,5 m punktivahega**



Mina, Reijo-Tero Roopalu,

sünniaeg 16.03.1990,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö  
Staatilise laserskaneerimise andmete põhjal puistangu mahtude arvutamise täpsus,  
mille juhendaja on Natalja Liba,

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega  
isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor \_\_\_\_\_

(allkiri)

Tartu, 28.05.2018

---

### Juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

Natalja Liba \_\_\_\_\_

(juhendaja nimi ja allkiri)

\_\_\_\_\_ 28.05.2018

(kuupäev)